

# Untersuchung von Fahrmanövern in Geschwindigkeitsüberwachungs- situationen

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Phys. Johannes Kupper  
aus: Borna

eingereicht am: 01.11.2017  
mündliche Prüfung am: 16.05.2018

Gutachter: Prof. Dr. Karsten Lemmer  
Prof. Dr. Bernhard Friedrich



# Vorwort

In meinem zweiten Jahr als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) reifte in mir der Gedanke, dass ein Dokortitel ganz erstrebenswert sei. In diesem Jahr begann ich daher zusammen mit meinem Fachbereichsleiter Herrn Prof. Dr. Jäger ein Dissertationsthema zu definieren. Nach anfänglichen Schwierigkeiten gelang es uns ein Thema zu finden und abzugrenzen, welches für eine Promotion geeignet erschien. Herr Prof. Dr. Lemmer vom Institut für Verkehrssystemtechnik beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) erklärte sich daraufhin bereit, als Doktorvater meine Promotion zu betreuen. In den Jahren 2013 – 2017 erarbeitete ich schließlich die vorliegende Dissertation.

Zu Beginn meiner Promotionsphase musste ich leider den tragischen Tod von Herrn Jäger hinnehmen. Dies stellte einen schmerzlichen Verlust für mich und für viele Kolleginnen und Kollegen in der PTB dar. Ich möchte an dieser Stelle Herrn Jäger für die Aufnahme in die PTB und seine Mithilfe im Vorfeld meiner Promotionsphase danken. Nach dem Tod von Herrn Jäger übernahm Herr Dr. Märtenz von Seiten der PTB die Betreuung meiner Doktorarbeit. Für diese Unterstützung – insbesondere in der schwierigen Anfangsphase – gehört Herrn Märtenz mein herzlicher Dank. Von Seiten des DLR wurde ich durch Herr Prof. Dr. Köster betreut. In fruchtbaren Diskussionen flossen mit Herrn Köster's Hilfe wertvolle Aspekte in diese Dissertation ein. Daher gebührt auch Herrn Köster mein großer Dank. Herrn Lemmer möchte ich an dieser Stelle für seine zielführenden Rückmeldungen während der Promotionsphase und das Interesse an meiner Arbeit danken. Außerdem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Friedrich und Herrn Dr. Becker für die Begutachtung bzw. den Vorsitz in der Prüfungskommission bedanken. Bei Herrn Prof. Dr. Schwartz von der PTB möchte ich mich dafür bedanken, dass er am Anfang meiner Promotionsphase die kurzfristige Finanzierung der benötigten Sensorik ermöglichte. Allen anderen Kolleginnen und Kollegen möchte ich für die vielfältigen Hilfestellungen und den kollegialen Rückhalt meinen Dank aussprechen.

Ein weiterer wichtiger Personenkreis, ohne den ich diese Arbeit sicher nicht hätte realisieren können, umfasst meine Familie und meine Freunde. Bei meiner Familie möchte ich mich bedanken, weil sie mich zu dieser Arbeit motiviert und beim Abrunden dieser Arbeit geholfen hat. Meinen Freunden möchte ich für die schönen und erfrischenden Momente danken, die mir dabei geholfen haben, den nötigen Abstand zu dieser Dissertation zu wahren. Der größte Dank gehört meiner Frau. Sie war bereit, mir die nötige Zeit für diese Arbeit einzuräumen. Außerdem hat Sie mit viel Liebe, Verständnis und Trost zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Kontext . . . . .	1
1.2 Motivation und Forschungsfragen . . . . .	1
1.3 Methoden . . . . .	6
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Stand der Wissenschaft</b>	<b>9</b>
2.1 Verkehrsmodelle . . . . .	9
2.1.1 Fahrzeugfolgemodelle . . . . .	10
2.1.2 Zellularautomatenmodelle . . . . .	11
2.1.3 Lighthill-Whitham Modell . . . . .	11
2.1.4 Fundamentaldiagramm und Verkehrszustände . . . . .	13
2.2 Geschwindigkeitsbegrenzung . . . . .	17
2.2.1 Historie in Deutschland . . . . .	17
2.2.2 Auswirkungen der Geschwindigkeitsbegrenzung auf den Verkehr . .	18
2.3 Verkehrsbeeinflussungsanlagen . . . . .	19
2.3.1 Netzbeeinflussungsanlagen . . . . .	20
2.3.2 Streckenbeeinflussungsanlagen . . . . .	20
2.3.3 Knotenpunktbeeinflussungsanlagen . . . . .	23
2.3.4 Punktuell querschnittsbezogen wirksame Anlagen . . . . .	23
2.4 Geschwindigkeitsüberwachung . . . . .	24
2.4.1 Überwachungstechnik in Deutschland . . . . .	24
2.4.2 Auswirkungen der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehr . . . . .	25
2.4.3 Auswirkungen der Abschnittskontrolle auf den Verkehr . . . . .	29
2.4.4 Weitere Überwachungskonzepte . . . . .	31
2.5 Zusammenfassung zum Stand der Wissenschaft . . . . .	31

<b>3</b>	<b>Untersuchungsmethoden</b>	<b>33</b>
3.1	Messung des Verkehrsflusses . . . . .	34
3.1.1	Sensorik . . . . .	34
3.1.2	Untersuchte Streckenabschnitte . . . . .	37
3.2	Umfrage . . . . .	44
3.3	Bestimmung von Surrogate Safety Measures . . . . .	44
3.4	Zusammenfassung der Untersuchungsmethoden . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Auswertung der Umfrage</b>	<b>49</b>
4.1	Fragenkomplex: Persönliches . . . . .	50
4.2	Fragenkomplex: Geschwindigkeitsbewusstsein . . . . .	50
4.3	Fragenkomplex: Geschwindigkeitswahl . . . . .	53
4.4	Fragenkomplex: Reaktion im Überwachungsfall . . . . .	57
4.5	Zusammenfassung der Umfrageergebnisse . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Auswertung der Verkehrsflussmessungen</b>	<b>65</b>
5.1	Verkehrsflussmessungen auf der A1 bei Bremen . . . . .	65
5.1.1	Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A1) . . . . .	66
5.1.2	Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A1) . . . . .	71
5.1.3	Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A1) . . . . .	86
5.1.4	Zusammenfassung (A1) . . . . .	91
5.2	Verkehrsflussmessungen auf der A2 bei Braunschweig . . . . .	94
5.2.1	Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A2) . . . . .	94
5.2.2	Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A2) . . . . .	102
5.2.3	Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A2) . . . . .	109
5.2.4	Zusammenfassung (A2) . . . . .	114
5.3	Verkehrsflussmessungen auf der B6 bei Hannover . . . . .	118
5.3.1	Der unbeeinflusste Verkehr . . . . .	120
5.3.2	Der Einfluss punktueller Überwachung . . . . .	123
5.3.3	Der Einfluss der Anlage zur Abschnittskontrolle . . . . .	134
5.3.4	Zusammenfassung (B6) . . . . .	140
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung der Erkenntnisse</b>	<b>147</b>
<b>7</b>	<b>Empfehlungen und Ausblick</b>	<b>153</b>

<b>A</b>	<b>Weitere Auswertung der Verkehrsflussmessungen</b>	<b>157</b>
A.1	Verkehrsflussmessungen auf der A3 bei Köln . . . . .	157
A.1.1	Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A3) . . . . .	157
A.1.2	Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A3) . . . . .	160
A.1.3	Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A3) . . . . .	162
A.1.4	Zusammenfassung (A3) . . . . .	163
A.2	Verkehrsflussmessungen auf der A71 bei Suhl . . . . .	164
A.2.1	Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A71) . . . . .	164
A.2.2	Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A71) . . . . .	168
A.2.3	Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A71) . . . . .	170
A.2.4	Zusammenfassung (A71) . . . . .	171
<b>B</b>	<b>Weitere Auswertung der Umfrage</b>	<b>173</b>
B.1	Fragenkomplex: Meinung . . . . .	173
B.2	Fragenkomplex: Kenntnis . . . . .	174
B.3	Untersuchung des Einflusses der Routine der Teilnehmer . . . . .	178
B.4	Untersuchung des Einflusses des Geschlechts der Teilnehmer . . . . .	181
B.5	Untersuchung des Einflusses des Alters der Teilnehmer . . . . .	184
B.6	Zusammenfassung der weiteren Umfrageergebnisse . . . . .	186
<b>C</b>	<b>Statistische Aspekte der Auswertung</b>	<b>187</b>
C.1	Parameterschätzung . . . . .	187
C.2	Parametertests . . . . .	188
C.3	Weitere statistische Tests . . . . .	189
<b>D</b>	<b>Umfragebogen</b>	<b>191</b>
<b>E</b>	<b>Erläuterung der Schemas</b>	<b>197</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>201</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>205</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>207</b>



# Formelzeichen und Abkürzungen

$\langle a \rangle$	.....	Mittlere Beschleunigung
$\langle v \rangle$	.....	Mittlere Geschwindigkeit
$N$	.....	Anzahl einer Menge von Fahrzeugen
$Q$	.....	Verkehrsstärke
$\Delta t$	.....	Zeitdifferenz
$\Delta v$	.....	Geschwindigkeitsdifferenz
$\bar{v}_h$	.....	Harmonisch gemittelte Geschwindigkeit
$\bar{v}_l$	.....	Mittlere lokale Geschwindigkeit
$\bar{x}$	.....	Mittelwert einer Verteilung von Messwerten/Zufallsvariablen
$\hat{t}$	.....	Testvariable bei Parametertests
$v_{zul}$	.....	Zulässige Höchstgeschwindigkeit
$\mu$	.....	Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion
$\rho$	.....	Verkehrsdichte
$\rho_{max}$	.....	Maximale Verkehrsdichte
$\sigma^2$	.....	Varianz einer Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion
$\sigma_v$	.....	Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilung
$\tau$	.....	Zeitspanne
$a$	.....	Beschleunigung
$b$	.....	Belegungsgrad der Sensormessbasis
$c$	.....	Quantil einer Wahrscheinlichkeitsverteilung
$c(\rho)$	.....	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Änderung der Verkehrsdichte
$d$	.....	Abstand zweier Fahrzeuge

$l$ .....	Detektorlänge
$n$ .....	Stichprobenumfang
$s, \Delta s$ .....	Wegstrecke
$s^2$ .....	Standardabweichung einer Verteilung von Messwerten/Zufallsvariablen
$t$ .....	Zeit
$t_{\text{brutto}}$ .....	Bruttozeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen
$v$ .....	Geschwindigkeit
$v_{85}$ .....	Geschwindigkeit, die von 85 % der Fahrzeuge nicht überschritten wird
$v_{\text{Start}}$ .....	Startgeschwindigkeit
$v_e$ .....	Geschwindigkeit im Gleichgewicht
$v_f$ .....	Frei wählbare Geschwindigkeit
$v_w$ .....	Geschwindigkeitsparameter im Fahrzeugfolgemodell
$w$ .....	Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Sprungs in der Verkehrsdichte
$x$ .....	Position in x-Richtung
$x_i$ .....	Statistische Zufallsvariable
GNSS .....	Global Navigation Satellite System, z. B. GPS oder Galileo
LKW .....	Lastkraftwagen
MBV .....	Maximale Bremsverzögerung
PKW .....	Personenkraftwagen
PTB-A .....	Anforderungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
SC .....	Section Control, Abschnittskontrolle
SSM .....	Surrogate Safety Measures
TA .....	Time to Accident
THW .....	Time Headway
TLSB .....	Time to Last Second Breaking
TTC .....	Time-To-Collision
UZ .....	Unterzentrale

VRZ ..... Verkehrsrechnerzentrale

VÜG ..... Verkehrsüberwachungsgerät, Geschwindigkeitsüberwachungsgerät

WVA ..... Wechselverkehrszeichenanlage, auch Streckenbeeinflussungsanlage

WVZ ..... Wechselverkehrszeichen

WWW ..... Wechselwegweiser

WZG ..... Wechselzeichengeber





# 1. Einführung

## 1.1. Kontext

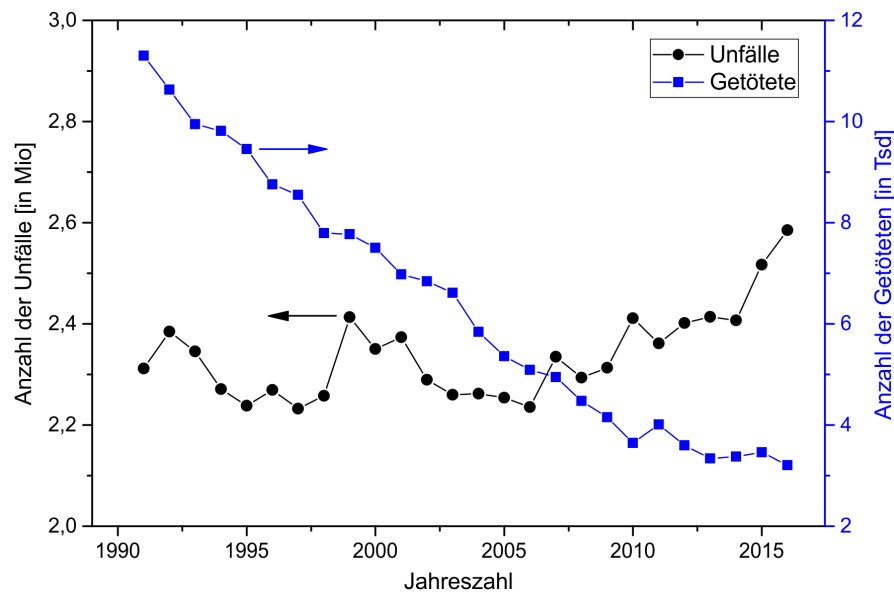
Die Zahl der Straßenverkehrsunfälle ist in Deutschland seit 1991 relativ konstant geblieben. In den vergangenen Jahren zeigte sich ein leichter Anstieg auf ca. 2,6 Millionen im Jahr 2016. Die Zahl der jährlich getöteten Personen hingegen fiel zwischen 1991 und 2016 von 11 300 auf 3206 ab [SBA17]. Obwohl das Verkehrsaufkommen in der Vergangenheit stetig anstieg [BAS16], nahm die Zahl der Verkehrstoten in Deutschland somit tendenziell ab (Abbildung 1.1). Diese Entwicklung spiegelt die kontinuierliche Erhöhung der Verkehrssicherheit wieder.

Die Erhöhung der Verkehrssicherheit kann auf einen umfangreichen Maßnahmenkatalog zurückgeführt werden. Dieser beinhaltet die Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik in den Fahrzeugen, die Verbesserung von Verkehrsinfrastruktur und Rettungssystemen und die kontinuierliche Verkehrsüberwachung [Koo02, Roz06, Elv09]. Mit Hilfe der genannten Maßnahmen wird stetig das Ziel verfolgt, die Verkehrssicherheit zu verbessern und damit die direkt und indirekt mit Unfällen verbundenen Kosten der straßengebundenen Mobilität zu senken [EUK10, BMV11].

Das Ziel der vorliegenden Dissertationsschrift ist es, die Fahrmanöver in Geschwindigkeitsüberwachungssituationen zu untersuchen und damit neue Erkenntnisse zum Fahrverhalten im Überwachungsfall zu generieren. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse werden hier Empfehlungen formuliert, die im Rahmen zukünftiger Verkehrssicherheitsprojekte verwendet werden können, um die aktuell bestehende Verkehrssicherheit weiter zu erhöhen.

## 1.2. Motivation und Forschungsfragen

Die Geschwindigkeitsüberwachung ist Teil des oben beschriebenen Maßnahmenkatalogs. Sie wird in Deutschland durch Polizei und Kommunen vielerorts betrieben, um besonders an Gefahrenpunkten die Anzahl und Schwere von Verkehrsunfällen zu reduzieren. Dass mit Hilfe der Geschwindigkeitsüberwachung dieses Ziel erreicht werden kann, wurde in der wissenschaftlichen Literatur bereits umfangreich bewiesen. Die bisher durchgeführten Untersuchungen geben allerdings kaum einen Einblick in die individuellen Fahrmanöver der einzelnen Fahrzeugführer, die sich in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation befinden. Die Arbeiten von Liu et al., Ragnoy, Lippold et al., Lodes et al., de Pauw et al., Marciano et al. und Shim et al. vermitteln zwar einen ersten Eindruck von den Fahrma-



**Abbildung 1.1.:** Übersicht über die zeitliche Entwicklung der Anzahl der jährlichen Unfälle und der Anzahl der jährlich getöteten Personen im Straßenverkehr der Bundesrepublik Deutschland. Die Daten beruhen auf den Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes [SBA17].

növern im Überwachungsfall, diese Arbeiten betrachten allerdings nicht die Beschleunigungswerte und Fahrmanöver einzelner Autofahrer, sondern treffen vorwiegend Aussagen zum gesamten Fahrerkollektiv [Liu11, Rag11, Lip12, Lod13, Pau14b, Mar15, Shi15]. Außerdem erreichen die bisher existierenden Arbeiten häufig nur eine örtliche Auflösung von mehreren hundert Metern bezüglich der Änderungen des Verkehrsflusses am Überwachungsort bzw. auf dem überwachten Streckenabschnitt. Es existieren daher auch nur grobe Anhaltspunkte darüber, wie sich der Verkehrsfluss am Überwachungsort bzw. auf dem überwachten Streckenabschnitt örtlich verändert.

Um mit Hilfe einer Geschwindigkeitsüberwachungsmaßnahme die Verkehrssicherheit effektiv zu erhöhen, ist das Wissen über die Fahrmanöver und die örtlichen Änderungen des Verkehrsflusses aber essenziell. Es besteht hier daher noch erheblicher Forschungsbedarf. Aus diesem Forschungsbedarf leiten sich die ersten beiden Forschungsfragen dieser Dissertation ab:

## Forschungsfragen 1 und 2

1. Welche Fahrmanöver sind in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu beobachten und mit welchen Häufigkeiten treten die einzelnen Fahrmanöver auf?
2. Welche Änderungen im Verkehrsfluss sind in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort ( $\pm 100$  m) feststellbar?

In einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation ist zu erwarten, dass die Fahrzeugführer zunächst Verzögerungsmanöver und anschließend Beschleunigungsmanöver durchführen. In der Diskussion über den Nutzen der Geschwindigkeitsüberwachung für die Verkehrssicherheit wird daher häufig behauptet, dass die Geschwindigkeitsüberwachung zu kritischen Verzögerungsmanövern führt und in Folge dessen es am Überwachungsort zu einer Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisionssituationen kommt. Vor dem Hintergrund dieser Behauptung werden der Geschwindigkeitsüberwachung dann gern negative Konsequenzen für die Verkehrssicherheit zugeschrieben. Aus dieser Behauptung heraus erwachsen die Forschungsfragen 3 bis 5 dieser Dissertation:

### **Forschungsfragen 3 bis 5**

3. Hat die Geschwindigkeitsüberwachung kritische Verzögerungsmanöver zur Folge?
4. Führen die Fahrmanöver in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu einer Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisionssituationen?
5. Welche Schlussfolgerungen können anhand der Fahrmanöver und der Änderungen des Verkehrsflusses bezüglich der Verkehrssicherheit gezogen werden?

Die Forschungsfragen 1 bis 5 werden im Rahmen dieser Dissertation für zwei sehr verschiedene Geschwindigkeitsüberwachungssituationen studiert. Zum einen werden punktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte betrachtet und zum anderen wird ein Streckenabschnitt untersucht, der mittels Abschnittskontrolle (Section Control) überwacht wird. Für die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung besteht dabei teilweise die Besonderheit, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit am Überwachungsort durch Streckenbeeinflussungsanlagen geregelt wird.

Die vorliegende Arbeit betrachtet damit gleich zwei der Maßnahmen aus dem oben angesprochenen Maßnahmenkatalog – die Geschwindigkeitsüberwachung als Vertreterin der Verkehrsüberwachungsmaßnahmen und Streckenbeeinflussungsanlagen als Teil der Infrastruktur. Der Fokus dieser Arbeit wurde gezielt auf die genannten Geschwindigkeitsüberwachungssituationen gelegt, weil die punktuelle Überwachung in Deutschland sehr stark verbreitet ist und für die Abschnittskontrolle anzunehmen ist, dass diese zukünftig in Deutschland zunehmend Verbreitung finden wird.

Die Bearbeitung der Forschungsfragen 1 bis 5 wird zeigen, wie sich der Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort bzw. auf dem überwachten Streckenabschnitt verändern. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden Empfehlungen für den zukünftigen Einsatz der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung und der Abschnittskontrolle formuliert. Diese werden relevant sein für zukünftige Verkehrssicherheitsprojekte.

Auf einigen Autobahnabschnitten in Deutschland wird die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung in Kombination mit einer Streckenbeeinflussungsanlage betrieben. Streckenbeeinflussungsanlagen stellen den Autofahrern die zulässige Höchstgeschwindigkeit

mittels elektronischer Anzeigen dar. Diese Anzeigen werden zentral gesteuert. Die Stellzustände werden dabei an die aktuelle Verkehrssituation sowie die Witterung angepasst. Streckenbeeinflussungsanlagen werden in Deutschland in mehreren Bundesländern von den zuständigen Straßenverkehrsbehörden betrieben, um den Verkehrsfluss zu optimieren und auf Gefahrensituationen hinzuweisen. Die Überwachung der Geschwindigkeit liegt hingegen im Zuständigkeitsbereich der Polizei und der Kommunen. Ziel aller genannten Entscheidungsträger ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Dafür müssen die beiden Maßnahmen aufeinander abgestimmt werden und sich ergänzen. Während in einer Reihe von Veröffentlichungen sowohl für die Geschwindigkeitsüberwachung als auch für die Streckenbeeinflussungsanlagen ein positiver Einfluss auf die Verkehrssicherheit nachgewiesen werden konnte, ist die Wirkung der Kombination beider Systeme auf den Verkehr bisher nicht systematisch betrachtet worden. Die Arbeiten von Soriguera et al. stellen diesbezüglich eine Ausnahme dar [Sor14, Sor15a]. Die dort gewonnenen Erkenntnisse sind allerdings sehr rudimentär. Um diese Lücke im Stand der Wissenschaft zu schließen, wurden für diese Dissertation die Forschungsfragen 6 und 7 formuliert:

### Forschungsfragen 6 und 7

6. Heben sich die positiven Wirkungen, die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung und Streckenbeeinflussungsanlage jeweils auf die Verkehrssicherheit haben, bei der Kombination beider Systeme auf, oder unterstützen sich beide Systeme hinsichtlich der Verkehrssicherheit?
7. Gibt es ein Verbesserungspotenzial bei der aktuell praktizierten Kombination von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und Streckenbeeinflussungsanlage?

Die Antworten zu diesen beiden Forschungsfragen können im Rahmen zukünftiger Verkehrssicherheitsprojekte genutzt werden, um beide Maßnahmen optimal aufeinander abzustimmen und so die Verkehrssicherheit effektiv zu erhöhen.

Bisher wurde in Deutschland die Geschwindigkeitsüberwachung vorwiegend punktuell betrieben. Da in diesem Fall der Überwachungsort eine Besonderheit im Straßennetz darstellt, kann das Erkennen eines punktuellen Überwachungsgerätes bei den Autofahrern zu örtlichen Verzögerungs- und anschließenden Beschleunigungsvorgängen führen. Eine vielversprechende Alternative zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung stellt die Abschnittskontrolle dar. Aus dem Ausland ist bekannt, dass diese den Überwachungsdruck auf den gesamten Streckenabschnitt ausdehnt und so die örtlichen Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver minimiert. Beide Aspekte sind als Vorteil der Abschnittskontrolle gegenüber der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung zu werten. In Deutschland wurde bisher keine Abschnittskontrolle durchgeführt. Das Bundesland Niedersachsen hat im Jahr 2014 in Form eines Pilot-Projektes begonnen, eine Anlage zur Abschnittskontrolle in Deutschland zu betreiben. Die vorliegende Dissertation untersucht die Pilot-Anlage zur Abschnittskontrolle im Bezug auf die Fahrmanöver und den Verkehrsfluss. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Untersuchung wird die folgende Forschungsfrage geklärt:

### Forschungsfrage 8

8. Lassen sich die beiden aus dem Ausland bekannten Vorteile der Abschnittskontrolle auch für die Pilot-Anlage hier in Deutschland messtechnisch nachweisen?

Mit Hilfe einer auf demselben Streckenabschnitt stattfindenden punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung erfolgt außerdem ein direkter Vergleich beider Überwachungsstrategien. Dieser Vergleich beantwortet die letzte Forschungsfrage dieser Dissertation:

### Forschungsfrage 9

9. Unter welchen Randbedingungen ist die Abschnittskontrolle für die Erhöhung der Verkehrssicherheit besser geeignet als eine punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung?

In den bisher existierenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen war dieser direkte Vergleich zwischen den Wirkungen der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung und der Abschnittskontrolle nur schwer möglich. Die größte Schwierigkeit stellte dabei meist die Tatsache dar, dass für beide Überwachungsmaßnahmen verschiedene Streckenabschnitte betrachtet werden mussten. In [Cha08, Lah16] wird zwar für beide Überwachungsmaßnahmen derselbe Streckenabschnitt betrachtet, dort werden allerdings vorwiegend Unfallzahlen für den Vergleich herangezogen und nur grobe Aussagen zum Verkehrsfluss und zum Fahrverhalten getroffen.

Die Klärung der Forschungsfragen 8 und 9 wird damit erstmals zeigen, ob die Abschnittskontrolle hier in Deutschland die Verkehrssicherheit ähnlich gut erhöht, wie das aus dem Ausland bereits bekannt ist, und wann zukünftig besser mit Hilfe der Abschnittskontrolle versucht werden sollte, die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

Die Forschungsfragen dieser Arbeit legen dar, dass auf dem Gebiet der Geschwindigkeitsüberwachung nach wie vor Forschungsbedarf besteht. Insgesamt gesehen wird diese Arbeit helfen, das Fahrverhalten der Fahrzeugführer im Überwachungsfall besser zu verstehen. Aus diesen Erkenntnissen werden hier Empfehlungen abgeleitet, die für den Einsatz der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung und der Abschnittskontrolle in zukünftigen Verkehrssicherheitsprojekten relevant sein werden. Diese Empfehlungen können zudem genutzt werden, um aktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsmaßnahmen zu optimieren und so mit den bereits vorhandenen Mitteln die Verkehrssicherheit weiter zu erhöhen. Die Untersuchungen werden außerdem zeigen, wo die Grenzen der Wirksamkeit der aktuell in Deutschland praktizierten Geschwindigkeitsüberwachung liegen. Inwieweit diese Grenzen zukünftig mit Hilfe der Abschnittskontrolle verschoben werden können, wird ebenfalls in dieser Dissertation erläutert. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werden daher einen entscheidenden Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit in Deutschland leisten. Für alle Entscheidungsträger auf dem Gebiet der Geschwindigkeitsüberwachung werden die Ergebnisse dieser Arbeit relevant sein.

Im Sinne der Übersichtlichkeit werden die Forschungsfragen dieser Arbeit in drei Themenschwerpunkte eingeteilt. Der Schwerpunkt I befasst sich mit den Fahrmanövern, dem Verkehrsfluss und der Verkehrssicherheit in den beiden untersuchten Geschwindigkeitsüberwachungssituationen – punktuelle Überwachung und Abschnittskontrolle (Forschungsfragen 1 bis 5). Im Schwerpunkt II wird die kombinierte Wirkung von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und Streckenbeeinflussungsanlage auf die Verkehrssicherheit betrachtet (Forschungsfragen 6 und 7). Der letzte Themenschwerpunkt, Schwerpunkt III, dient dem Vergleich der Abschnittskontrolle in Deutschland mit den Anlagen des Auslands und der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung bezüglich der Wirkungen auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit (Forschungsfragen 8 und 9). Im Folgenden findet sich zur Veranschaulichung nochmals die Zuordnung der einzelnen Forschungsfragen zu den drei Themenschwerpunkten:

### **Schwerpunkt I**

- Forschungsfrage 1
- Forschungsfrage 2
- Forschungsfrage 3
- Forschungsfrage 4
- Forschungsfrage 5

### **Schwerpunkt II**

- Forschungsfrage 6
- Forschungsfrage 7

### **Schwerpunkt III**

- Forschungsfrage 8
- Forschungsfrage 9

## 1.3. Methoden

Im Rahmen dieser Dissertation werden die Fahrmanöver untersucht, die von Fahrzeugführern in der unmittelbaren Umgebung zu punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten bzw. auf einem mittels Abschnittskontrolle überwachten Streckenabschnitt durchgeführt werden. Diese Untersuchungen werden sowohl mit Hilfe von Verkehrsflussmessungen als auch mit Hilfe einer Umfrage durchgeführt. Die gesammelten Messdaten werden dazu dienen, die Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver detailliert zu beschreiben und die örtliche Änderung des Verkehrsflusses darzustellen. Mit Hilfe der gewonnenen Parameter des Verkehrsflusses wird anschließend die Verkehrssicherheit betrachtet werden. Ein Vergleich der Messdaten mit den Umfrageergebnissen wird weitere Erkenntnisse zum Fahrverhalten im Überwachungsfall liefern.

Die Betrachtung der Verkehrssicherheit wird hier nicht anhand von Unfallzahlen erfolgen, sondern mit Hilfe von Parametern des Verkehrsflusses. Dabei werden sogenannte Surrogate Safety Measures zum Einsatz kommen. Surrogate Safety Measures stellen einen Zusammenhang zwischen den mikroskopischen Größen des Verkehrsflusses und der Kritikalität einer Verkehrssituation her. Sie gelten daher als Hilfsgrößen der Verkehrssicherheit. Üblicherweise werden Unfallzahlen herangezogen, um Aussagen über die Verkehrssicherheit zu treffen. Diese bieten sich im Kontext dieser Arbeit aber nicht an,

weil Surrogate Safety Measures einen viel detaillierteren Einblick in die Fahrmanöver am Überwachungsort bieten, im Gegensatz zu Unfallzahlen nicht so stark jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen und auf sehr kurzen Zeitskalen ( $\leq 1$  Tag) bereits statistisch signifikante Aussagen ermöglichen.

Die Parameter des Verkehrsflusses können auch dazu verwendet werden, um die Unfallzahlen und deren Änderungen abzuschätzen. Dafür lassen sich in der wissenschaftlichen Literatur eine Reihe unterschiedlicher mathematischer Zusammenhänge finden. Diese Möglichkeit der Abschätzung wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt, weil eine solche Abschätzung auf Grund der einfließenden Unsicherheiten keinen Mehrwert im Kontext der gestellten Forschungsfragen bietet.

Der Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Fahrmanöver und damit auf die Verkehrssicherheit hängt von einer Reihe von Faktoren ab (Verkehrszustand, Witterung, Anteil der ortskundigen Fahrer, Anteil des Schwerlastverkehrs, ...). Um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Verkehrsflussmessungen in dieser Arbeit zu gewährleisten, wurde daher festgelegt, dass hier nur Untersuchungszeiträume betrachtet werden, in denen ein stabiler und freier Verkehrszustand vorliegt (also kein Stau oder stockender Verkehr) und in denen weder Starkregen noch Glätte den Verkehr behindern. Weiterhin werden nur Werktage tagsüber in der ferienfreien Zeit betrachtet, um den Anteil von ortskundigen Fahrern sowie den Anteil des Schwerlastverkehrs möglichst konstant zu halten.

## 1.4. Aufbau der Arbeit

Der Inhalt dieser Dissertation gliedert sich insgesamt in sieben Kapitel. Das Kapitel 1 endet bereits mit diesem Abschnitt. Es diene der Einordnung dieser Arbeit in den bereits bestehenden wissenschaftlichen Rahmen und der Erläuterung der gestellten Forschungsfragen.

Im folgenden Kapitel 2 wird die Beschreibung des Verkehrs mit Hilfe von Verkehrsmodellen eingeführt. Diese Einführung ist wichtig für das Verständnis der später diskutierten Messdaten und Schlussfolgerungen. Um einen Überblick über die bestehenden Vorarbeiten zu geben, werden im Kapitel 2 außerdem die bereits in der Wissenschaft vorhandenen Erkenntnisse bezüglich der Auswirkungen auf den Verkehr von Geschwindigkeitsbegrenzungen, Verkehrsbeeinflussungsanlagen (insbesondere Streckenbeeinflussungsanlagen) und Geschwindigkeitsüberwachungen vorgestellt. Es werden dort aber auch einige nicht untersuchte Aspekte auf dem Gebiet der Geschwindigkeitsüberwachung genannt, so dass damit der im Abschnitt 1.2 vorgestellte Forschungsbedarf nochmals unterstrichen wird.

Im Kapitel 3 werden die in dieser Arbeit angewandten Untersuchungsmethoden detailliert beschrieben. Dieses Kapitel bietet damit einen Einblick in die Herangehensweise, mit der die formulierten Forschungsfragen bearbeitet werden.

In den beiden sich anschließenden Kapiteln 4 und 5 werden die Ergebnisse dieser Arbeit aufbereitet und die Forschungsfragen beantwortet. Die Kapitel 4 und 5 stellen somit den Kern dieser Arbeit dar.

Das Kapitel 6 dient der Zusammenfassung aller Ergebnisse und Erkenntnisse. Im letzten Kapitel, Kapitel 7, werden schließlich entsprechende Empfehlungen für zukünftige Verkehrssicherheitsprojekte formuliert und ein kurzer Ausblick gegeben.

Weiterführende Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, die aber die Forschungsfragen nur grob beantworten bzw. nicht direkt adressieren, werden im Anhang präsentiert. Dort sind außerdem ergänzende Informationen bezüglich dieser Arbeit zu finden.



## 2. Stand der Wissenschaft

Die vorliegende Dissertation thematisiert die Geschwindigkeitsüberwachung und deren Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit. Dieses Kapitel wird dazu dienen, in die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung des Verkehrs mit Hilfe von Verkehrsmodellen einzuführen. Diese Einführung wird die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Messdaten und Schlussfolgerungen besser nachvollziehbar machen.

Außerdem werden in diesem Kapitel die bereits untersuchten und verstandenen Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeitsüberwachung und Verkehr vorgestellt, um den aktuellen Stand der Wissenschaft zu klären. Weil für die Forschungsfragen dieser Arbeit außerdem Geschwindigkeitsbegrenzungen und Streckenbeeinflussungsanlagen (Verkehrsbeeinflussungsanlagen) relevant sind, wird dieses Kapitel auch die bereits bekannten Auswirkungen von Geschwindigkeitsbegrenzungen und Verkehrsbeeinflussungsanlagen auf den Verkehr thematisieren.

Einige der vom Stand der Wissenschaft nicht erfassten Punkte auf dem Gebiet der Geschwindigkeitsüberwachung werden in diesem Kapitel ebenfalls aufgeführt, um den im Abschnitt 1.2 vorgestellten Forschungsbedarf nochmals zu verdeutlichen.

### 2.1. Verkehrsmodelle

Die Gesamtheit aller Ortsveränderungen von Personen und Fahrzeugen im öffentlichen Straßennetz wird als Straßenverkehr bezeichnet. Die dabei durchgeführten Bewegungsvorgänge entspringen der Interaktion der verschiedenen Verkehrsteilnehmer untereinander und werden unter dem Begriff Verkehrsfluss zusammengefasst. Die theoretische Beschreibung des Verkehrsflusses kann auf drei unterschiedlichen Abstraktionsebenen erfolgen. Es wird zwischen der mikroskopischen, der mesoskopischen und der makroskopischen Beschreibung unterschieden. Bei der mikroskopischen Beschreibung dienen Vielteilchensysteme als Verkehrsmodelle. Die mesoskopische Beschreibung basiert auf nicht lokalen gas-kinetischen Verkehrsmodellen. Die makroskopische Beschreibung wird mittels flüssigkeits-dynamischer Verkehrsmodelle realisiert [Pip64, Hel98, Hel99, Hel01a, Hel01b, TRB11].

Während bei den mikroskopischen Verkehrsmodellen der Verkehrsfluss anhand des Fahrverhaltens der einzelnen Fahrzeuge beschrieben wird, treten bei den makroskopischen Modellen aggregierte Größen wie die mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge eines Streckenabschnitts, die Verkehrsstärke und die Verkehrsdichte auf. Die Parameter der mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsmodelle eignen sich besonders gut zur

Untersuchung der Wirkungen von Streckenbeeinflussungsanlagen und Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit.

Mesoskopische Verkehrsmodelle sind an die kinetische Gastheorie angelehnt und verbinden mikroskopische mit makroskopischen Modellen. Sie finden bei Problemstellungen praktische Anwendung, bei denen man die Vorteile mikroskopischer und makroskopischer Modelle kombiniert nutzen möchte. Im Folgenden wird auf die mesoskopischen Verkehrsmodelle nicht näher eingegangen, da die Parameter dieser Modelle für diese Arbeit keine Relevanz haben.

### 2.1.1. Fahrzeugfolgemodelle

Prominente Vertreter der mikroskopischen Verkehrsmodelle stellen die Fahrzeugfolgemodelle dar. Fahrzeugfolgemodelle nehmen an, dass die Beschleunigung eines Fahrzeugs im Verkehrsstrom durch die benachbarten Fahrzeuge – insbesondere durch das vorausfahrende Fahrzeug – beeinflusst wird. Die fahrphysikalischen Eigenschaften spielen in diesen Modellen eine untergeordnete bis gar keine Rolle. Auf Grund dieser einfachen Annahmen lautet die Grundgleichung aller Fahrzeugfolgemodelle [Mon64, Leu66, Hel01b]:

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{v_w(s_i, v_i, \Delta v_i) - v_i}{\tau} \quad . \quad (2.1)$$

Die Beschleunigung des  $i$ -ten Fahrzeugs  $dv_i/dt$  hängt hier von einer vom Verkehrszustand abhängigen Geschwindigkeit  $v_w$ , der Eigengeschwindigkeit des Fahrzeuges  $v_i$  und der Sensitivität des Fahrers auf Geschwindigkeitsunterschiede zu reagieren  $1/\tau$  ab. Die Geschwindigkeit  $v_w$  wiederum besitzt als Eingangsgrößen den Abstand zum Vordermann  $s_i$ , die Eigengeschwindigkeit  $v_i$  und die Relativgeschwindigkeit im Bezug zum Vordermann  $\Delta v_i$ . Für den einfachsten Repräsentanten der Fahrzeugfolgemodelle gilt [Leu66, Hel01b, Sch07a]:

$$\frac{dv_i(t + \Delta t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [v_{i-1}(t) - v_i(t)] \quad . \quad (2.2)$$

Auf der linken Seite der Gleichung steht die Reaktion, die ein Fahrzeugführer mit einer Zeitverzögerung  $\Delta t$  auf Grund des Stimulus, hier die Geschwindigkeitsdifferenz auf der rechten Seite der Gleichung, durchführt. Bei dieser Gleichung handelt es sich um eine verzögerte Differentialgleichung, die instabile Lösungen annimmt für hinreichend große Zeitverzögerungen  $\Delta t$  [Mon64, Hel01b]. Es konnte experimentell und theoretisch gezeigt werden, dass für  $\Delta t/\tau \geq 0,5$  der Verkehrsfluss einer Fahrzeugkolonne instabil wird und es zum Zusammenbruch des Verkehrsflusses kommen kann.

Es existieren eine Reihe von Verfeinerungen für dieses einfachste Fahrzeugfolgemodell. Diese Weiterentwicklungen betrachten neben Überholvorgängen auch fahrphysikalische Gegebenheiten und gehen davon aus, dass ein Fahrer eine Wahrnehmungsschwelle für Geschwindigkeitsdifferenzen besitzt, die außerdem vom Abstand zum Vordermann abhängt.

Das Erkennen und Interpretieren von Verkehrszeichen, sowie das individuelle Fahrverhalten eines jeden Fahrzeugführers stellen weitere Einflussfaktoren dar. Außerdem werden aktuell stochastische Einflüsse auf diese einfachen Modelle untersucht [Ken16]. Auf Grund der Vielzahl dieser unterschiedlichen Einflüsse können Fahrzeugfolgemodelle die Realität nur vereinfacht abbilden.

### 2.1.2. Zellularautomatenmodelle

Eine weitere Gruppe mikroskopischer Verkehrsmodelle wird unter dem Oberbegriff Zellularautomatenmodelle zusammengefasst. Zellularautomatenmodelle beschreiben die Fahrphysik – ähnlich wie die einfachen Fahrzeugfolgemodelle – nicht sonderlich detailliert. Sie sind bekannt für ihre echtzeitfähigen Simulationen zum Verhalten einer großen Fahrzeugmenge und ihre komplexen dynamischen Lösungen. Zellularautomatenmodelle beruhen auf der Diskretisierung des Ortes (Zellen) und der Zeit und der Wechselwirkung eines Fahrzeugs mit einer kleinen Zahl benachbarter Fahrzeuge. Ein bekannter Vertreter der Zellularautomatenmodelle ist das Nagel-Schreckenberg-Modell. Bei diesem Modell wird der Verkehr mit Hilfe eines fest vorgeschriebenen Algorithmus simuliert, den alle Fahrzeuge parallel für einen festen Zeitschritt durchlaufen müssen [Nag92, Neu00, Hel01b].

1. Bewegung: Das Fahrzeug wird entsprechend seiner Geschwindigkeit eine gewisse Anzahl Zellen nach vorn bewegt.
2. Beschleunigung: Wenn ein Fahrzeug seine maximale Geschwindigkeit noch nicht erreicht hat, so wird seine Geschwindigkeit erhöht.
3. Abbremsen: Ist der Abstand zum Vordermann kleiner als die aktuelle Geschwindigkeit, so wird die Geschwindigkeit entsprechend reduziert, um eine Kollision zu vermeiden.
4. Zufall: Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wird die aktualisierte Geschwindigkeit reduziert, um Geschwindigkeitsfluktuationen auf Grund eines nicht perfekten Fahrverhaltens zu simulieren.

Im Hinblick auf Verkehrszusammenbrüche besteht der prinzipielle Unterschied zwischen Zellularautomatenmodell und Fahrzeugfolgemodell darin, dass im Zellularautomatenmodell Geschwindigkeitsfluktuationen nötig sind, um Verkehrszusammenbrüche erklären zu können [Hel01b]. Diese Tatsache zeigt, dass durch die vereinfachten Annahmen, die einem speziellen Modell zu Grunde liegen, nur ein begrenzter Teil der Realität dargestellt werden kann. Wie bereits beim Fahrzeugfolgemodell diskutiert, existieren auch für die Zellularautomatenmodelle beliebige Verfeinerungen, die helfen die Realität besser abzubilden.

### 2.1.3. Lighthill-Whitham Modell

Das bekannteste makroskopische Verkehrsmodell basiert auf der Annahme, dass kein Fahrzeug auf dem betrachteten Streckenabschnitt hinzukommt oder verschwindet. Diese

zeitliche Erhaltung der Gesamtzahl der Fahrzeuge führt zur Kontinuitätsgleichung [Lig55a, Lig55b, Lig64, Leu66, Hel01b, Sch07a]:

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

mit der Verkehrsdichte  $\rho(x, t)$  am Ort  $x$  zur Zeit  $t$  und der Verkehrsstärke  $Q(x, t)$ . Die Verkehrsstärke beschreibt die Anzahl der Fahrzeuge  $N$  die während einer Beobachtungszeit  $t$  einen bestimmten Ort passiert haben. Sie wird für gewöhnlich in [KFZ/h] angegeben. Die Verkehrsdichte gibt an, wie viele Fahrzeuge  $N$  sich auf einem bestimmten Streckenabschnitt befinden. Sie wird für gewöhnlich in [KFZ/km] angegeben. Lighthill und Whitham nahmen an, dass die Verkehrsstärke eine einfache Funktion der Verkehrsdichte ist [Lig55a, Lig55b, Lig64, Leu66, Hel01b]:

$$Q(x, t) = Q(\rho(x, t)) = \rho v_e(\rho(x, t)) \quad . \quad (2.4)$$

Wobei  $v_e$  die mittlere Geschwindigkeit im Gleichgewicht bezeichnet. Setzt man Gleichung (2.4) in die Kontinuitätsgleichung (2.3) ein, so erhält man die nicht lineare Wellengleichung für die Verkehrsdichte [Lig55a, Leu66, Hel01b]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + c(\rho) \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad . \quad (2.5)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung konnten Lighthill und Whitham die Ausbreitung von Dichteänderungen auf dem betrachteten Streckenabschnitt beschreiben. Die Änderung der Verkehrsdichte erfolgt dabei mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c(\rho) = \partial Q / \partial \rho$ , welche stets kleiner ist als die mittlere Geschwindigkeit  $v_e$ . Deshalb wandert der Ort der Dichteänderung relativ zum Fahrzeugstrom immer flussaufwärts. Ist  $c(\rho)$  größer Null so wandert der Ort der Dichteänderung relativ zu einem festen Ort flussabwärts. Ist  $c(\rho)$  hingegen kleiner Null, so wandert der Ort der Dichteänderung relativ zu einem festen Ort flussaufwärts.

Das einfache Modell von Lighthill und Whitham eignet sich außerdem zur Beschreibung von Stauwellen. Besitzen zwei aneinander grenzende Streckenabschnitte unterschiedliche Verkehrsdichten, so existiert ein Dichtesprung am Berührungspunkt der beiden Streckenabschnitte. Die Geschwindigkeit  $w$ , mit der sich dieser Dichtesprung ausbreitet, ist gegeben durch [Lig55a, Lig55b, Lig64, Leu66, Hel01b, Sch07a]:

$$w = \frac{Q_1 - Q_2}{\rho_1 - \rho_2} \quad . \quad (2.6)$$

Hier bezeichnen  $Q_{1/2}$  und  $\rho_{1/2}$  die Verkehrsstärken bzw. Verkehrsdichten der beiden Streckenabschnitte. Die Geschwindigkeit  $w$  wird auch als Stoßwellen- oder Schockwellengeschwindigkeit bezeichnet und kennzeichnet die Ausbreitungsgeschwindigkeit des entsprechenden Verkehrszustandes.

### 2.1.4. Fundamentaldiagramm und Verkehrszustände

Neben dem Lighthill-Whitham Modell spielt das Fundamentaldiagramm eine bedeutende Rolle in der makroskopischen Beschreibung des Verkehrs. Mit Hilfe des Fundamentaldiagramms lassen sich insbesondere die verschiedenen Verkehrszustände anschaulich erläutern. Als Verkehrszustand versteht man eine Kombination von Werten der makroskopischen Parameter Verkehrsdichte, Verkehrsstärke und Geschwindigkeit.

Wie bereits bekannt, ist die Verkehrsstärke  $Q(x, t)$  definiert als die Anzahl der Fahrzeuge, die während einer bestimmten Zeit den Beobachtungsort passieren. Aus dieser Definition folgt, dass die reziproke Verkehrsstärke gleich der mittleren Zeitlücke der passierenden Fahrzeuge ist. Die Zeitlücke  $\Delta t$  zwischen zwei Fahrzeugen wiederum ist gleich dem Quotienten aus dem Abstand  $d$  beider Fahrzeuge und der Geschwindigkeit  $v$  des hinteren Fahrzeugs. Deshalb folgt [Hel01b]:

$$\frac{1}{Q(x, t)} = \langle \Delta t_i \rangle = \langle \frac{d_i}{v_i} \rangle = \langle d_i \rangle \langle \frac{1}{v_i} \rangle + \text{cov} \left( d_i, \frac{1}{v_i} \right) , \quad (2.7)$$

wobei  $\text{cov}(d_i, 1/v_i)$  die Kovarianz zwischen den Abständen der Fahrzeuge und der inversen Geschwindigkeit dieser Fahrzeuge ist. Diese Kovarianz ist negativ und nur relevant bei großen Verkehrsdichten. Mit dieser Näherung und der Definition der Verkehrsdichte  $1/\rho = \langle d_i \rangle$  folgt aus Gleichung (2.7) die Fundamentalgleichung (2.8), welche identisch ist mit der von Lighthill und Whitham getroffenen Annahme (siehe Gleichung (2.4)) [Gre35, War52, Lig55b, Kor60, Lig64, Hel01b, Küh05]:

$$Q(x, t) = \rho(x, t) \bar{v}_h(x, t) , \quad (2.8)$$

wobei  $\bar{v}_h$  die harmonisch gemittelte Geschwindigkeit

$$\bar{v}_h := \frac{1}{\frac{1}{N} \sum \frac{1}{v_i}} = \frac{Nl}{\sum t_i} = \frac{\sum t_i v_i}{\sum t_i} \quad (2.9)$$

bezeichnet. In Gleichung (2.9) beschreibt  $N$  die Anzahl der Fahrzeuge die zur Mittelwertbildung beitragen,  $v_i$  die Geschwindigkeit des  $i$ -ten Fahrzeugs und  $t_i$  dessen Zeit, die es benötigt, um einen Detektor der Länge  $l$  zu überqueren. Aus der Fundamentalgleichung (2.8) geht hervor, dass die Verkehrsstärke, die Verkehrsdichte und die harmonisch gemittelte Geschwindigkeit die wichtigsten Parameter in diesem makroskopischen Modell des Verkehrsflusses darstellen.

Bei experimentellen Untersuchungen mit feststehenden lokalen Detektoren wird häufig die mittlere lokale Geschwindigkeit

$$\bar{v}_l := \frac{\sum v_i}{N} = \frac{l \sum \frac{1}{t_i}}{N} \quad (2.10)$$

bestimmt. Sowohl die harmonisch gemittelte Geschwindigkeit als auch die mittlere lokale Geschwindigkeit können für die Beschreibung des Verkehrsflusses verwendet werden. Der

Vergleich beider Geschwindigkeitsdefinitionen macht deutlich, dass bei der harmonisch gemittelten Geschwindigkeit, im Gegensatz zur mittleren lokalen Geschwindigkeit, die Geschwindigkeitsmesswerte mit der Verweilzeit auf dem Detektor gewichtet werden. Es gilt daher  $\bar{v}_l \geq \bar{v}_h$  [War52, Kor60].

Verfolgt man die Annahme von Lighthill und Whitham (Gleichung (2.4)) weiter und nimmt man an, dass die mittlere Geschwindigkeit wie folgt von der Verkehrsdichte abhängt [Gre35, Küh05, Sch07a]:

$$v_e(\rho) = v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}}\right) \quad , \quad (2.11)$$

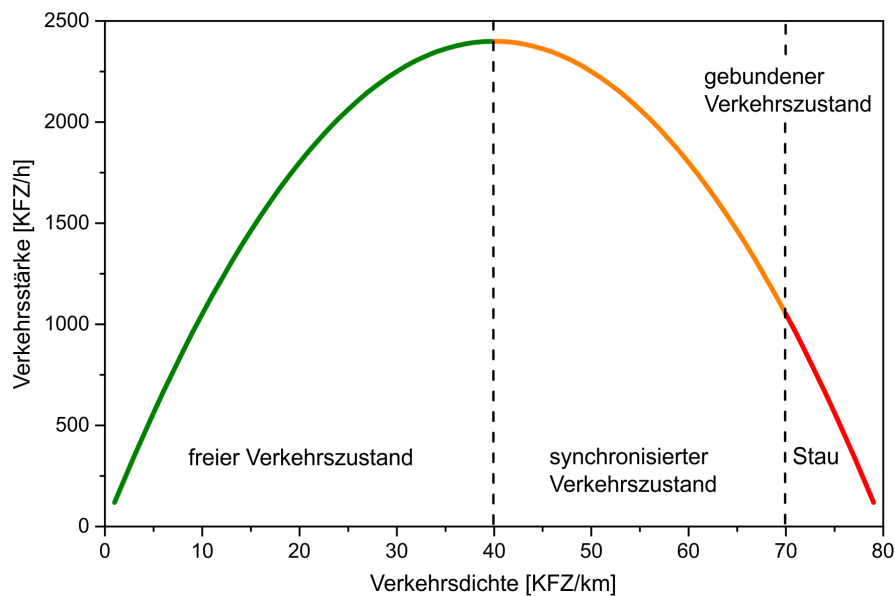
so ergibt sich aus der Fundamentalgleichung der folgende Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte [Gre35, Küh05, Sch07a, TRB11]:

$$Q(\rho) = v_f \rho \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\max}}\right) \quad . \quad (2.12)$$

Hier bezeichnet  $v_f$  die freie Geschwindigkeit, die ein Fahrzeugführer bei niedrigen Verkehrsdichten auf dem betrachteten Streckenabschnitt wählt und  $\rho_{\max}$  die auf dem Streckenabschnitt maximal mögliche Verkehrsdichte. In Abbildung 2.1 wird der Zusammenhang aus Gleichung (2.12) grafisch dargestellt. Dieses Diagramm wird auch als Fundamentaldiagramm bezeichnet.

Mit Hilfe der makroskopischen Beschreibung des Verkehrs kann man verschiedene Zustände des Verkehrsflusses (Verkehrszustände) identifizieren und spezifizieren. Diese Klassifizierung der Verkehrszustände erfolgt in der Literatur nicht einheitlich und beschränkt sich meist auf den mehrstreifigen Verkehr in einer Fahrtrichtung (z. B. Autobahn) [Küh05]. In den Arbeiten von Helbing et al. [Hel99, Hel01a, Hel03] werden neben dem freien Verkehrszustand fünf behinderte Verkehrszustände beschrieben (Stop & Go, Stauwellen, homogen zähfließender Verkehr, oszillierend zähfließender Verkehr und lokalisierte Zusammenbrüche). Kerner et al., Neubert et al. und Knospe et al. unterscheiden hingegen nur zwischen freiem Verkehrsfluss (free flow) und gebundenem Verkehrsfluss (congested flow), wobei der gebundene Verkehrsfluss noch in synchronisierten (synchronised flow) Verkehrsfluss und Stau (wide moving jam) eingeteilt wird [Ker96, Ker97, Neu99, Neu00, Kno02]. Als gebunden gelten dabei alle Zustände, in denen die einzelnen Fahrzeuge sich zu Fahrzeugpuls zusammenschließen, oder die mittleren Geschwindigkeiten benachbarter Fahrstreifen stark synchronisiert sind. Überholmanöver sind dann kaum noch möglich. Im freien Zustand fließt der Verkehr ungestört. Im Fundamentaldiagramm findet man die drei Verkehrszustände (frei, synchronisiert und Stau) einfach wieder (siehe Abbildung 2.1). Außerdem kann man in diesem Diagramm die Übergänge zwischen den einzelnen Zuständen gut beschreiben.

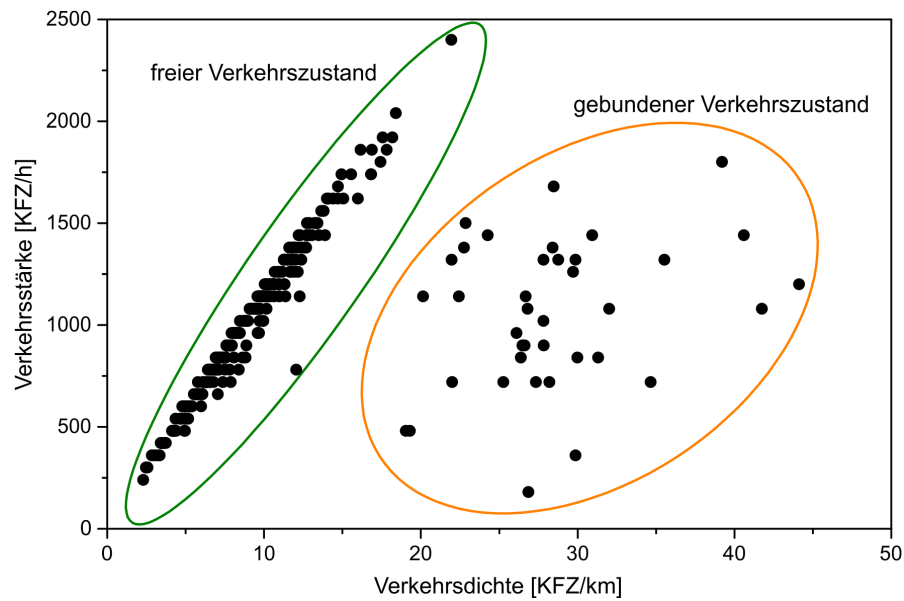
Bei niedrigen Dichten steigt die Verkehrsstärke nahezu linear mit steigender Verkehrsdichte an. Der Anstieg in diesem Bereich entspricht der freien Geschwindigkeit  $v_f$ , die von den Fahrzeugführern gewählt werden kann, wenn mehrere Fahrstreifen und Überholmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Hier herrscht der freie Verkehrszustand vor. Mit weiter



**Abbildung 2.1.:** Ideales Fundamentaldiagramm nach Gleichung (2.12) mit zugehörigen Verkehrszuständen.

steigender Verkehrsdichte wird die Verkehrsstärke maximal, bevor sie auf Grund der stetig sinkenden mittleren Geschwindigkeit abnimmt. Für alle Verkehrsdichten, die größer sind als die Verkehrsdichte bei maximaler Verkehrsstärke, befindet sich der Verkehrsfluss im gebundenen Zustand [Ker96, Ker97, Sug08]. Mit weiter steigenden Verkehrsdichten wird schließlich eine kritische Dichte erreicht, bei der der Verkehrsfluss zum Erliegen kommt (Stau). Wenn Stau vorliegt, nimmt die mittlere Geschwindigkeit deutlich kleinere Werte als im synchronisierten oder freien Zustand an [Hel01b].

In vielen Messungen findet sich der freie Verkehrszustand – wie oben beschrieben – wieder. In diesem Verkehrszustand zeigen die Messwerte der Verkehrsstärke eine nahezu lineare Abhängigkeit von der Verkehrsdichte (siehe Abbildung 2.2). Die Abweichung der Messwerte vom nahezu linearen Verlauf ist minimal. Für größere Verkehrsdichten zeigt das Experiment einen Übergang vom freien zum gebundenen Zustand. Unter der Voraussetzung, dass keine Verkehrsbehinderungen vorliegen, erfolgt dieser Übergang typischerweise bei Verkehrsdichten zwischen 50 und 80 Fahrzeugen pro Spur und Kilometer [MAZ99]. Der Übergang erfolgt meist innerhalb eines Zeitintervalls von etwa 15 Minuten [Neu99, Neu00]. Die Dichte, bei der dieser Übergang erfolgt, lässt sich nur schwer bestimmen und ist daher mit großen Unsicherheiten versehen [Gei11b]. Die Schwierigkeit dieser messtechnischen Bestimmung liegt zum einen in der kurzen Zeit in der die Zustandsänderung erfolgt und zum anderen in der messtechnischen Herausforderung Verkehrsstärke und Verkehrsdichte gleichzeitig zu bestimmen.



**Abbildung 2.2.:** Reales Fundamentaldiagramm aufgezeichnet für einen Messtag auf der Überholspur einer Autobahn mit zugehörigen Verkehrszuständen. Die Messdaten beruhen auf Minutenmittelwerten.

Im Experiment streuen Verkehrsstärke und Verkehrsdichte des gebundenen Zustandes stark. Im Fundamentaldiagramm ergibt sich daher für den gebundenen Zustand eine zweidimensionale Fläche, in der sich die Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte bewegen kann (siehe Abbildung 2.2). Ursache dieser großen Streuung sind die Ortsabhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit in diesem Zustand, die bei großen Dichten nicht zu vernachlässigende Abhängigkeit zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Fahrzeugabstand, die Zusammensetzung des Verkehrs aus LKW und PKW und die vom Fahrerkollektiv abhängige Verteilung der Fahrzeugabstände [Ker96, Hel01b]. Neubert et al. konnten zeigen, dass im gebundenen Zustand die Geschwindigkeiten benachbarter Fahrzeuge – spurübergreifend – gut miteinander korrelieren und sich bei mittleren Verkehrsdichten Fahrzeugpuls ausbilden [Neu99, Neu00]. Das in der Theorie beschriebene Maximum der Verkehrsstärke bei mittleren Verkehrsdichten und der bei sehr großen Verkehrsdichten zusammenbrechende Verkehrsfluss können ebenfalls im Experiment gezeigt werden [Neu99, Hel01b, Sug08].

Im Bereich mittlerer Verkehrsdichten kann sowohl der gebundene als auch der freie Zustand auftreten. Der Verkehrsfluss ist in diesem Bereich metastabil. Der Übergang zwischen beiden Zuständen kann hier bereits bei minimalen Störungen erfolgen. Diese Störungen können sich ab einer kritischen Dichte zu einem Stau aufschaukeln, oder aber ohne Staubildung wieder verschwinden [Ker97, Hel01b, Hel03, Sug08, Gei11b]. Entscheidend dafür, ob sich ein Stau bildet, ist das Verhältnis zwischen der Zahl zu- und



abfließenden Fahrzeuge. Ist der stromabwärtige Abfluss geringer als der stromaufwärtige Zufluss so entsteht ein Stau [Ker96]. Die minimale Störung kann bereits durch einen Spurwechsel, oder auf Grund von Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrzeugen hervorgerufen werden. Es ist dann vom „Stau aus dem Nichts“ die Rede [Hel01a, Sug08].

## 2.2. Geschwindigkeitsbegrenzung

### 2.2.1. Historie in Deutschland

Die Erfindung des Automobils 1886 durch Carl Benz revolutionierte den öffentlichen Straßenverkehr grundlegend. Dies war der Beginn stetig steigender Mobilität und Geschwindigkeit. Der sprunghafte Anstieg der gefahrenen Geschwindigkeiten und die Sorge um die Verkehrssicherheit führten im Jahre 1910 zu einer in allen deutschen Ländern geltenden Straßenverkehrsordnung. Diese Straßenverkehrsordnung legte fest, dass innerorts eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 15 km/h galt. Für Fahrzeuge mit einer Masse ab 5,5 t galt zudem eine generelle Begrenzung (innerorts und außerorts) von 12 km/h bis 16 km/h [Pra95, Pra99].

Die Entwicklung des Automobils und der damit verbundene Wunsch nach höheren zulässigen Geschwindigkeiten schritt rasch voran. Viele lokale Behörden genehmigten deshalb auch höhere Geschwindigkeitsbegrenzungen als es die Verordnung von 1910 vorsah. Im Jahre 1923 wurde die Straßenverkehrsordnung dann schließlich revidiert. Von nun an galten innerorts für Fahrzeuge bis 5,5 t 30 km/h bis 40 km/h und für Fahrzeuge ab 5,5 t 25 km/h als zulässige Höchstgeschwindigkeit. Außerhalb geschlossener Ortschaften gab es keine Geschwindigkeitsbegrenzungen mehr. Nachdem 1934 alle geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen aufgehoben wurden und in Folge dessen die Zahl der Verkehrstoten rapide anstieg, wurde aus Gründen der Verkehrssicherheit und der Ressourcenschonung 1939 eine neue Straßenverkehrsordnung erlassen. Darin wurde festgeschrieben, dass innerorts ab sofort nur noch mit maximal 40 km/h gefahren werden durfte. Außerorts galt für PKW eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h und für LKW von 60 km/h [Pra95, Pra99].

Im Jahre 1952 wurden für PKW zunächst wieder alle Geschwindigkeitsbegrenzungen aufgehoben. Die besorgniserregende Entwicklung der Unfallzahlen führte aber bereits 1957 zu einer allgemeinen Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h innerorts. Da die Zahl der Getöteten im Straßenverkehr immer weiter anstieg und 1971 fast die Marke von 20 000 erreichte, wurde im Jahre 1972 ein generelles Tempolimit von 100 km/h auf Landstraßen versuchsweise eingeführt. Die Ölkrise führte zu einer weiteren Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit außerorts auf 80 km/h [Pra96a, Pra99].

Nach der Ölkrise wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit für PKW auf Landstraßen mit 100 km/h beibehalten, da die Unfallzahlen eine positive Entwicklung zeigten. 1974 wurde schließlich die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h für PKW auf Autobahnen ein-

geführt. Zulässige Höchstgeschwindigkeiten für PKW auf Autobahnen wurden in der Vergangenheit immer wieder politisch diskutiert, eine generelle Einführung fand aber bis zum heutigen Tage nicht statt [Pra96b, Pra96c, Pra99].

### 2.2.2. Auswirkungen der Geschwindigkeitsbegrenzung auf den Verkehr

Allgemein gilt, dass die Geschwindigkeitsbegrenzung nachvollziehbar und vernünftig sein muss, um von den Fahrzeugführern akzeptiert zu werden [Kay82, Kre83, Zaa94, Gol07, Elv09]. In [Kor60, Bit65, Sch66, New70, Han74, Büs75, Kre83, Fie88, McK90, Pfe91, Alj99, Ret99, Sch07b, Ret08b] konnte nachgewiesen werden, dass mit Hilfe einer Geschwindigkeitsbegrenzung die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses nachhaltig beeinflusst werden kann. Es zeigte sich, dass die Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung bzw. die Senkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu reduzierten Geschwindigkeiten im Verkehrsfluss führen. Der Betrag dieser Reduzierung hängt dabei von der mittleren Geschwindigkeit ab, die vor der Einführung der Begrenzung bzw. Senkung der Höchstgeschwindigkeit gefahren wurde [Büs75, Kre83, Ret99]. In einer Arbeit von Lamm et al. konnte beispielsweise mit der Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung die mittlere Geschwindigkeit um 25 bis 30 km/h gesenkt werden [Lam84]. Die Überwachung dieser Geschwindigkeitsbegrenzung führte zu einer nochmaligen Senkung um bis zu 20 km/h. Bei Nilsson und Retzko et al. hatte eine Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit um 20 km/h eine um 2 km/h bis 8 km/h reduzierte mittlere Geschwindigkeit zur Folge [Nil81, Ret99]. Vadeby et al. fand ähnliche Auswirkungen. Einer Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit um 10 km/h führte dort zu Absenkungen der mittleren Geschwindigkeiten von 2 km/h bis 3 km/h [Vad14, Vad17].

Die Arbeiten von Korte et al., Bitzl, Büschges et al., Krebs et al., Krux et al. und Scholz et al. konnten zudem zeigen, dass mit der Einführung einer Geschwindigkeitsbegrenzung die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten sinkt [Kor60, Bit65, Büs75, Kre83, Kru98, Sch07b]. Der Geschwindigkeitsbegrenzung kann daher eine harmonisierende Wirkung auf den Verkehrsfluss zugeschrieben werden.

In weiteren wissenschaftlichen Arbeiten wurde festgestellt, dass mit Hilfe der Geschwindigkeitsbegrenzung der Anteil kritischer Zeitlücken zwischen benachbarten Fahrzeugen um bis zu 25 % gesenkt werden kann [Bur66, Köh76, Kno02] und die Geschwindigkeitsbegrenzung zu einer ausgeglicheneren Spurbesetzung führt [Sch66, Köh76, Sch07b]. Insgesamt weisen die genannten Auswirkungen der Geschwindigkeitsbegrenzung auf eine erhöhte Verkehrssicherheit hin [Büs75, Fie88, Alj99, Qui99a, Qui99b, Tay00, Elv04, Nil04, Elv05, Aar06, Elv09, Hau09, Sch10a].

Es wurde bisher außerdem untersucht, inwiefern sich dieser Hinweis in Form von reduzierten Unfallraten und reduzierter Unfallschwere bestätigen lässt. Es konnten Senkungen der Unfallraten von bis zu 40 % gefunden werden. Auch die Unfallschwere konnte nachweislich mit Hilfe der Geschwindigkeitsbegrenzung vermindert werden [Hos63, Bit65, Wep65, New70, Büs75, Nil81, Mar86, Gar90, Str90, Pfe91, Roc95, Nil04, Sch07b, Pau14c, Vad14,

Say16, Vad17]. In [Hau71] konnte zudem theoretisch gezeigt werden, dass die Unfallhäufigkeit sowohl mit der Einführung einer Mindestgeschwindigkeit als auch mit der Einführung einer Höchstgeschwindigkeit gesenkt werden kann, weil damit Geschwindigkeitsunterschiede und somit die Häufigkeit von Überholmanövern gesenkt werden.

Es existieren auch einige wenige Veröffentlichungen die von einer Reduzierung der Unfallrate nach der Anhebung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit berichten bzw. in denen die Unfallratenänderung nicht signifikant ausfiel [Ebe60, McK90, Pan92, Lav94, Gri95, Pau14c]. Der Großteil der Verkehrswissenschaftler spricht der Geschwindigkeitsbegrenzung aber eine verkehrssichernde Wirkung zu.

Die Auswirkungen einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf den Verkehrsfluss können mit Hilfe von am Straßenrand befindlichen Geschwindigkeitswarnanlagen erhöht werden. Diese Anlagen signalisieren den Fahrzeugführern mit Hilfe unterschiedlicher Anzeigen, ob deren Geschwindigkeit an die zulässige Höchstgeschwindigkeit angepasst ist oder nicht. Geschwindigkeitswarnanlagen stärken somit das Geschwindigkeitsbewusstsein der Fahrzeugführer. In [Ada81, Hou85, Rag91, Cas93, Zaa94, Oei96, Blo98, Kat98, Ste03a, Med09, Haj11, Kur11, Sch11] konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Geschwindigkeitswarnanlagen die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses senkt und so die Akzeptanz für die Geschwindigkeitsbegrenzung stärkt. Dart et al. konnte hingegen für Geschwindigkeitswarnanlagen kaum eine Wirkung auf das Fahrverhalten feststellen [Dar76]. In dem Artikel von Amado et al. konnte dargelegt werden, dass Autofahrer ihr Fahrverhalten tendenziell besser bewerten als es ein unabhängiger Dritter einschätzt. Diese systematische Überschätzung war dabei umso höher je gefährlicher die von den Autofahrern praktizierte Fahrweise war [Ama14]. Es wird von Amado et al. daher empfohlen, mit Hilfe von Geschwindigkeitswarnanlagen das Geschwindigkeitsbewusstsein zu stärken und die Gefahr überhöhter Geschwindigkeit bewusster zu machen. Insgesamt betrachtet zeigt die große Mehrheit der Veröffentlichungen, dass Geschwindigkeitswarnanlagen den Befolgungsgrad erhöhen.

## 2.3. Verkehrsbeeinflussungsanlagen

Verkehrsbeeinflussungsanlagen werden auf Bundesfernstraßen eingesetzt um die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss zu erhöhen. Eine Erhöhung des Verkehrsflusses geht häufig mit einer Verringerung der Umweltbelastung (Abgase und Lärm) und mit einer Verringerung von Zeit- und Energiekosten einher. Die Erhöhung der Verkehrssicherheit wiederum führt zu reduzierten Unfallkosten [BMV97b, Tra08]. Bei der Projektierung einer Verkehrsbeeinflussungsanlage müssen die genannten Kostenreduzierungen auf der Nutzenseite gegen die finanziellen Anstrengungen, eine Verkehrsbeeinflussungsanlage zu errichten, zu betreiben und zu unterhalten, abgewogen werden. Wie die Wirksamkeit einer geplanten oder bereits bestehenden Verkehrsbeeinflussungsanlage abgeschätzt werden kann, ist Bestandteil der aktuellen Forschung [Man96, Küh97, Pis03, Tra07, Nag07, Tra08, Bus09, Sor13, Ack15, Ack16a, Ack16b, Mai16].

Die Übereinstimmung der von einer Verkehrsbeeinflussungsanlage angezeigten Verkehrszeichen und Informationen mit der aktuellen Verkehrssituation bestimmt maßgeblich die Akzeptanz der Verkehrsbeeinflussungsanlage bei den Fahrzeugführern. Eine hohe Akzeptanz ist Voraussetzung für einen dauerhaften Betrieb der Anlage. Denn nur wenn die Anzeigen zu einer Verhaltensänderung bei den Fahrzeugführern führen, kann die Anlage die gewünschte Wirkung erzielen [Kay82, Ste03b, Tra07, Kap10, Hab13, Rie15, Rig16b, Rig16a].

Verkehrsbeeinflussungsanlagen werden in die folgenden Klassen eingeteilt [BMV97b]:

- Netzbeeinflussungsanlagen,
- Streckenbeeinflussungsanlagen,
- Knotenpunktbeeinflussungsanlagen,
- punktuell querschnittsbezogen wirksame Anlagen.

### 2.3.1. Netzbeeinflussungsanlagen

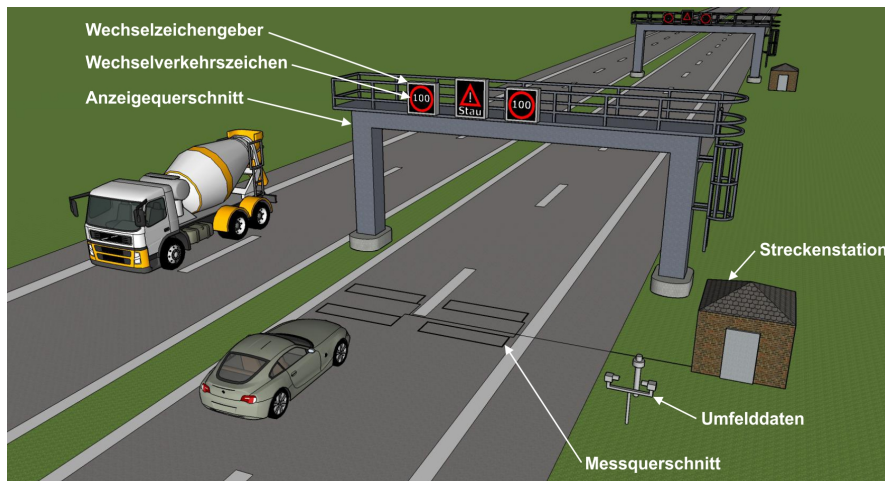
Netzbeeinflussungsanlagen dienen der optimalen Verteilung des Verkehrs auf das zur Verfügung stehende Streckennetz. Ist ein Streckenabschnitt überlastet, so kann die Netzbeeinflussungsanlage den Verkehr auf Streckenabschnitte umlenken, die noch Kapazitätsreserven besitzen. Für die Verkehrsstromlenkung stehen Wechselwegweiser (WWW) zur Verfügung, die je nach aktueller Verkehrslage die Autofahrer über alternative Routen informieren [BMV97b].

### 2.3.2. Streckenbeeinflussungsanlagen

Streckenbeeinflussungsanlagen stellen den Kraftfahrern aktuell gültige Gefahren- und Vorschriftzeichen (z. B. LKW-Überholverbote oder Geschwindigkeitsbegrenzungen) dar und beeinflussen so deren Verhalten [BMV97b]. Die Schaltprogramme von Streckenbeeinflussungsanlagen basieren zum einen auf aktuellen Verkehrs- und Umfelddaten und zum anderen auf Verkehrsmodellen und -prognosen. In dieser Arbeit werden insbesondere Streckenabschnitte mit Streckenbeeinflussungsanlagen untersucht, weshalb diese Anlagen im Folgenden etwas näher erläutert werden. Das System zur Verkehrsbeeinflussung mittels Streckenbeeinflussungsanlagen ist hierarchisch gegliedert in [BMV97b, TLS12]:

- Verkehrsrechnerzentralen (VRZ) (Ebene 1)
- Unterzentralen (UZ) (Ebene 2)
- Streckenstationen (Ebene 3 und 4)

Die VRZ ist für den Informationsaustausch zwischen den UZ verantwortlich. In der VRZ werden die einzelnen UZ eines Bundeslandes koordiniert. Eine Streckenbeeinflussungsanlage besteht aus einer UZ und mehreren mit dieser UZ verbundenen Streckenstationen.



**Abbildung 2.3.:** Schema eines Streckenabschnitts mit Streckenbeeinflussungsanlage.

Mit einer Streckenstation sind wiederum häufig ein Anzeigequerschnitt und ein Messquerschnitt verbunden (Abbildung 2.3). Die Anzeige- und Messquerschnitte einer Streckenbeeinflussungsanlage sind in Fahrtrichtung hintereinander angeordnet. Typischerweise haben benachbarte Anzeige- bzw. Messquerschnitte jeweils einen räumlichen Abstand von ca. 0,5 km bis ca. 2,0 km zueinander. Ein Anzeigequerschnitt selbst besteht aus mehreren Wechselzeichengebern (WZG), die dem Kraftfahrer aktuelle Verkehrsinformationen, sowie Gefahren- und Vorschriftzeichen in Form von Wechselverkehrszeichen (WVZ) anzeigen. Da Streckenbeeinflussungsanlagen ausschließlich WVZ für die Darstellung verwenden, werden diese Anlagen auch als Wechselverkehrszeichenanlagen (WVA) bezeichnet. Es können zusätzlich auch noch Umfelddensoren an der Streckenstation angeschlossen sein, um die Qualität der angezeigten Informationen zu verbessern. Die Umfelddensoren messen Wetter- und Fahrbahnbedingungen.

Jede Streckenstation erfasst mit Hilfe ihres Messquerschnitts den aktuellen Verkehrsfluss und die aktuellen Umfeldbedingungen am jeweiligen Messort. In der UZ werden die Messdaten aller Streckenstationen gesammelt und daraus Steuerbefehle abgeleitet. Diese Steuerbefehle werden der jeweiligen Streckenstation übermittelt, die daraufhin mit Hilfe des zugehörigen Anzeigequerschnitts auf den Verkehrsfluss einwirkt [BMV97b]. Die Einwirkung erfolgt allerdings nicht direkt, sondern nur in dem Maße in dem die Fahrzeugführer die angezeigten Gefahren- und Vorschriftzeichen akzeptieren und entsprechend befolgen. WVA und der auf dem zugehörigen Streckenabschnitt fließende Verkehr bilden somit einen klassischen Regelkreis. Die Regel- bzw. Führungsgröße ist der Verkehrsfluss. Ziel ist es, diesen unter den jeweiligen Randbedingungen zu optimieren.

In einer Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten wurde bereits der Einfluss von WVA auf den Verkehr erforscht [Elv09, Lu14, Kho15]. Den größten Einfluss auf den Verkehr erzielen

WVA mit Hilfe von situativen Geschwindigkeitsbegrenzungen und LKW-Überholverböten. Die Arbeiten von Zackor et al., Bode et al., van den Hoogen et al., Balz, Mangold et al., Steinhoff et al., Pischner et al., Schick, Rohde, McMurtry et al. und Geistefeldt haben gezeigt, dass mittels WVA die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten reduziert werden kann [Zac71, Zac72, Bod83, Zac88, Hoo94, Bal95, Man96, Ste02, Pis03, Sch03, Ste03b, Roh04, McM09, Gei11a]. Den WVA ist daher eine harmonisierende Wirkung auf den Verkehrsfluss zuzuschreiben.

Es konnte dort außerdem gezeigt werden, dass je nach Ausgangssituation die WVA zu einer erhöhten oder zu einer verminderten mittleren Geschwindigkeit führen. Wird die angezeigte Geschwindigkeitsbegrenzung der WVA gesenkt, so sinkt auch die mittlere Geschwindigkeit. Befindet sich aber der Verkehrsfluss in einem metastabilen Zustand bei mittleren Verkehrsdichten und wird die zuvor ausgeschaltete WVA durch das Schalten einer Geschwindigkeitsbegrenzung in Betrieb genommen, so führen die verminderten Streuungen der gefahrenen Geschwindigkeiten zu weniger Störungen im Verkehrsfluss und in der Folge zu einer höheren mittleren Geschwindigkeit. Die erhöhte mittlere Geschwindigkeit ist hier nicht als Sicherheitsverlust zu verstehen, sondern als Folge eines stabileren Verkehrsflusses.

In [Smu90, Pis03, Sch03, Wei13] konnte dargelegt werden, dass WVA zu einer ausgeglicheneren Fahrstreifenbelegung führen. In weiteren Arbeiten wurde zudem festgestellt, dass sich der Anteil kritischer Zeitlücken zwischen benachbarten Fahrzeugen durch den Einsatz von WVA reduzieren lässt [Zac71, Zac72, Zac88, Smu90, Hoo94, Ste02, Ste03b]. Die bisher genannten Wirkungen der WVA sind alle als Sicherheitsgewinn zu werten. Einen weiteren Sicherheitsgewinn erzielen die von der WVA dargestellten Gefahrenzeichen, die Kraftfahrer auf gefährliche Situationen hinweisen [Man96, Bal98, Ste00, Ste02, Ste03b]. Mit Hilfe der von Verkehrs- und Umfeldsensoren gelieferten Daten können die Verkehrsteilnehmer zum Beispiel vor Stauenden oder Nebelbänken gewarnt werden. Zackor et al., Balz, Mangold et al., Siegenger et al., Lee et al., Abdel-Aty et al., Habtemichael et al. und Riegelhuth et al. konnten zusätzlich verifizieren, dass sich durch den Einsatz von WVA die Unfallhäufigkeiten – besonders bei hohem Verkehrsaufkommen – reduzieren lassen [Zac88, Bal95, Man96, Sie00, Lee04, AA08, Hab13, Rie15]. Insgesamt kann daher geschlussfolgert werden, dass WVA einen Beitrag zur Verkehrssicherheit leisten indem sie auftretende Störungen verhindern, oder die Verkehrsteilnehmer vor Störungen warnen.

Die Harmonisierung des Verkehrsflusses und die Erhöhung der Verkehrssicherheit können auch mit festen Geschwindigkeitsbegrenzungen erzielt werden (siehe Abschnitt 2.2.2). Bei WVA erfolgen diese Wirkungen im Vergleich zu festen Geschwindigkeitsbegrenzungen allerdings in einem stärkeren Ausmaß [Zac71].

Wie im Abschnitt 2.1.4 bereits erläutert, können bei Vorliegen eines metastabilen Verkehrsflusses bereits kleine Störungen den Übergang vom freien zum gebundenen Verkehrszustand bewirken. Da Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Fahrzeugen den Ver-

kehrsfluss stören und diese mittels WVA abgebaut werden, stabilisieren WVA den Verkehrsfluss. Die erhöhte Verkehrssicherheit auf Abschnitten mit WVA führt weiterhin zu weniger unfallbedingtem Staus. WVA führen daher zu einem stabileren Verkehrsfluss indem Störpotenziale abgebaut werden und die Häufigkeit von auftretenden Störungen reduziert wird [Zac71, Zac72, Zac88, Smu90, Man96, Ste02, Pis03, Sch03, Bri05, Lee06, Pap08, Sch10b, Gei11a, Hab13, Hoo13, Tor14, Rie15, Pla16, Str16]. In den Arbeiten von Pischner et al. und Schick konnte dieser Effekt anhand der verminderten Zusammenbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsflusses bei mittleren und hohen Verkehrsstärken explizit gezeigt werden [Pis03, Sch03]. Falls eine Verkehrsflussstörung im Bereich einer WVA auftritt, so kann die WVA mit geeigneten Schaltprogrammen die negativen Auswirkungen der Störung auf den Verkehrsablauf abmildern und so selbst im Störfall den Verkehrsfluss erhöhen.

Ein weiteres Mittel, um den Verkehrsfluss effektiv zu verbessern, ist die Seitenstreifenfreigabe. Dieser temporär zur Verfügung gestellte Fahrstreifen ermöglicht eine deutliche Erhöhung der maximalen Verkehrsstärke und damit der Kapazität eines Streckenabschnitts [Sch03]. Die Seitenstreifenfreigabe erfolgt immer auf Kosten der Verkehrssicherheit. Sie kann daher nur begrenzt und kontrolliert eingesetzt werden. Eine Erhöhung der maximalen Verkehrsstärke eines Streckenabschnittes durch den Einsatz von WVA ohne Seitenstreifenfreigabe war bei Pischner et al., Schick, Schwietering, Soriguera et al. und Weigl et al. nicht nachweisbar [Pis03, Sch03, Sch10b, Sor13, Wei13], während Zackor, Smulders, Kühne, Brilon et al., Geistefeldt, Hoogendoorn et al. und Riegelhuth et al. Hinweise auf eine solche Kapazitätssteigerung finden konnten [Zac72, Smu90, Küh97, Bri05, Gei11a, Hoo13, Rie15].

### 2.3.3. Knotenpunktbeeinflussungsanlagen

Um den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit in einem einzelnen planfreien Knotenpunkt des Straßennetzes zu verbessern, werden Knotenpunktbeeinflussungsanlagen eingesetzt [BMV97b]. Diese Anlagen trennen Verkehrsströme, die um den selben Verkehrsraum konkurrieren. Als Beispiele können die Zufahrtsregelung bei Autobahnanschlussstellen und Lichtsignalanlagen an Kreuzungen genannt werden.

### 2.3.4. Punktuell querschnittsbezogen wirksame Anlagen

Punktuell querschnittsbezogen wirksame Anlagen zeichnen sich durch eine räumlich begrenzte Wirkung aus. Bei diesen Anlagen handelt es sich um Streckenbeeinflussungsanlagen, die häufig nur aus einem einzigen Anzeige- und Messquerschnitt bestehen. Sie werden gezielt an Unfallschwerpunkten betrieben, an denen andere Maßnahmen nicht umgesetzt werden können. Diese Anlagen werden meist isoliert, ohne Anbindung an das gesamte Verkehrsbeeinflussungssystem, betrieben [BMV97b].

## 2.4. Geschwindigkeitsüberwachung

Die Geschwindigkeitsüberwachung wird in Deutschland eingesetzt, um die Autofahrer bezüglich der Einhaltung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu kontrollieren. Ziel ist es, mit Hilfe der Kontrollen die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Die Geschwindigkeitsüberwachung stellt nach § 1 der Mess- und Eichverordnung eine amtliche Überwachung des öffentlichen Straßenverkehrs dar. Deshalb fallen die bei der Geschwindigkeitsüberwachung eingesetzten Messgeräte unter das Mess- und Eichgesetz. Diese Messgeräte müssen daher hinsichtlich ihrer Konformität mit den wesentlichen Anforderungen und dem Stand der Technik überprüft werden. Nur konforme Messgeräte dürfen für die Geschwindigkeitsüberwachung eingesetzt werden. Die jährliche Eichung garantiert die Messbeständigkeit der eingesetzten Messgeräte [MEG13, MEV14].

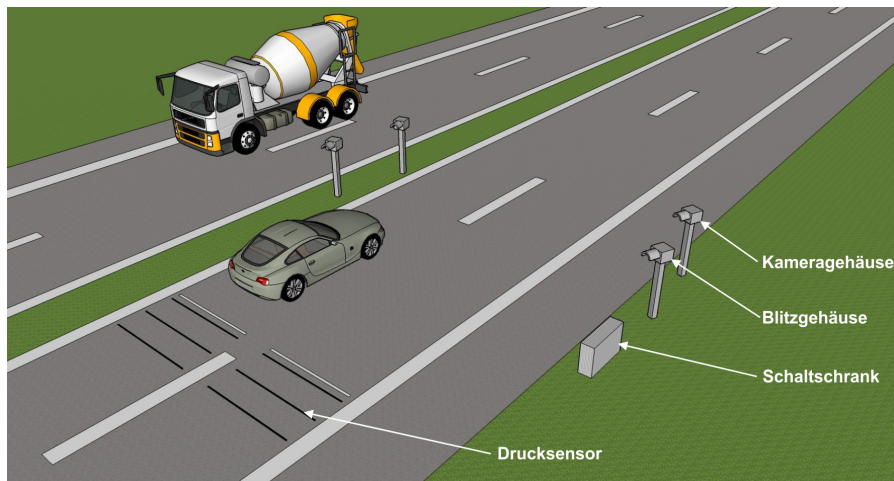
### 2.4.1. Überwachungstechnik in Deutschland

Die 1910 in allen deutschen Ländern eingeführten Geschwindigkeitsbegrenzungen wurden anfangs mit Hilfe von Schätzverfahren durch die Polizei überwacht [Pra95, Pra99]. In den 1920er und 1930er Jahren kamen dann Weg-Zeit-Messverfahren und das Nachfahren als neue Überwachungstechniken hinzu. Festgestellte Geschwindigkeitsübertretungen wurden damals aber nicht immer mit Bußgeldern, sondern teilweise auch durch das Ablassen der Luft aus den Reifen, geahndet [Pra95, Mar96, Pra99]. In der Folgezeit wurden Funkstopp-Verfahren und Spiegelmessverfahren entwickelt, die besondere Realisierungen der Weg-Zeit-Messverfahren darstellen [Mar96]. Am 02. Dezember 1958 wurde schließlich das erste Geschwindigkeitsüberwachungsgerät in Deutschland zugelassen [PTB58, Ros62, Jäg08]. Es handelte sich um ein Verkehrsradargerät vom Typ VRG 2 der Firma Telefunken.

Verkehrsradargeräte beruhen auf dem Doppler-Effekt bei Radarwellen und werden bis heute zur Geschwindigkeitsüberwachung betrieben. Weitere aktuell in Deutschland eingesetzte Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte beruhen auf der Laufzeitmessung von Laserpulsen oder arbeiten auf dem Prinzip der Weg-Zeit-Messung. Für Weg-Zeit-Messgeräte können Induktionsschleifen, druckempfindliche Sensoren oder optische Sensoren zum Einsatz kommen. Außerdem existieren noch Videonachfahrssysteme, die Geschwindigkeiten und Wegstrecken über den Abrollumfang der Reifen des Einsatzfahrzeugs bestimmen, und Verkehrs-Kontrollsysteme, die mit Hilfe eines Videosystems sowohl die Geschwindigkeiten als auch den Abstand zwischen den Fahrzeugen überwachen.

Die meisten der genannten Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte arbeiten punktuell. Das heißt, sie erfassen die Geschwindigkeiten der vorbeifahrenden Fahrzeuge nur lokal innerhalb einer Messbasis von maximal 30 m Länge. In Abbildung 2.4 wird ein punktuell arbeitendes Geschwindigkeitsüberwachungsgerät schematisch dargestellt. Dieses basiert auf Drucksensoren. Das Messgerät umfasst neben den Drucksensoren einen Schaltschrank sowie Blitzeinrichtungen und Kameras. In diesem Beispiel stehen für jede Fahrspur ein Blitz und eine Kamera zur Verfügung. Die Messbasis entspricht dem Abstand zwischen





**Abbildung 2.4.:** Schema eines punktuell arbeitenden Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes, welches auf Drucksensoren basiert. Das Messgerät umfasst neben den Drucksensoren einen Schaltschrank sowie Blitzeinrichtungen und Kameras.

dem ersten und dem letzten Drucksensor. Die Messbasis beträgt hier 2 m. Die Signale der Drucksensoren werden mit Hilfe der im Schaltschrank verbauten Komponenten verstärkt und ausgewertet. Diese Komponenten erfassen die Verweildauern der Fahrzeuge auf der Messbasis. Anhand der bekannten Länge der Messbasis und der gemessenen Verweildauern wird automatisch für jedes Fahrzeug die Geschwindigkeit berechnet. Liegt ein Geschwindigkeitsmesswert oberhalb des eingestellten Bildauslösegrenzwertes, wird mit Hilfe der jeweiligen Kamera ein Foto der Verkehrssituation erstellt. Der zugehörige Blitz dient zum Ausleuchten der Verkehrssituation – insbesondere des Fahrzeuginnenraums.

Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte können auch auf Streckenabschnitten mit WVA betrieben werden. Für einen automatisierten Messbetrieb auf diesen speziellen Streckenabschnitten benötigen diese Überwachungsgeräte eine Anbindung an die WVA. Diese Anbindung muss gewährleisten, dass immer die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit überwacht wird. In den Anforderungen der PTB mit der Nummer 12.01 (PTB-A 12.01), die den Stand der Technik für Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte definieren, werden daher hohe Anforderungen an diese WVA-Anbindung gestellt [PTB15]. Die aktuell zugelassenen Überwachungsgeräte mit WVA-Anbindung realisieren diese WVA-Anbindung ausschließlich kabelgebunden. Deshalb werden Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf Streckenabschnitten mit WVA bisher nur stationär (ortsfest) betrieben.

### 2.4.2. Auswirkungen der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehr

Die mit einem dokumentierten Geschwindigkeitsverstoß verbundene Bestrafung wird von den Behörden benutzt, um die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten unter den Autofahrern

durchzusetzen [Koo91, TRC06]. Das Androhen von Sanktionen führt zu einer Reduzierung der gefahrenen Geschwindigkeiten und zu einer erhöhten Aufmerksamkeit auf den überwachten Streckenabschnitten. Diese Wirkungen der Geschwindigkeitsüberwachung führen insgesamt zu mehr Verkehrssicherheit.

Dass reduzierte mittlere Geschwindigkeiten im Verkehrsfluss förderlich für die Verkehrssicherheit sind, wurde in der Literatur bereits mehrfach belegt [TRC06, Hau09]. Dies äußerte sich meist in einer mit sinkender mittlerer Geschwindigkeit abnehmenden Unfallrate. In [Qui99a, Qui99b] konnte explizit gezeigt werden, dass die Fahrer, die typischerweise eine höhere mittlere Geschwindigkeit wählen als andere Fahrer, bereits häufiger in Unfälle verwickelt waren. Bezüglich des exakten mathematischen Zusammenhangs zwischen mittlerer Geschwindigkeit und Unfallrate unterscheiden sich die verschiedenen Veröffentlichungen teilweise stark. Es werden sowohl lineare Zusammenhänge als auch Potenz- und Exponentialgesetze mit unterschiedlichen Koeffizienten und Exponenten angegeben [Fie88, Liu97, Qui99a, Qui99b, Tay00, Elv04, Nil04, Elv05, Aar06, Gol07, Elv09, Hau09, Sch10a]. Wenn durch die Überwachungsmaßnahme neben der Reduzierung der Geschwindigkeit außerdem die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten reduziert werden kann, so stellt dies einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn dar [Tay00].

Die meisten der im Abschnitt 2.4.1 genannten Überwachungstechniken sind nur punktuell wirksam. Damit sich die gewünschte Wirkung aber überall einstellt, muss ein möglichst flächendeckender Überwachungsdruck aufgebaut werden [Rot88, Cor00, Mus14]. Es sind daher sowohl verdeckte als auch sichtbare Überwachungsmaßnahmen notwendig, die möglichst an vielen verschiedenen Orten durchgeführt werden [Rot88, Mee93, Waa94, Zaa94, Koß96, Lut97, Oei98, Kea01, Pfe01, Mäk03, Ste06, Ret08a, Tho08, Mar15]. Entsprechend den Veröffentlichungen von Zaal, Champness et al., Ricker und Liu et al. sollte sichtbare stationäre Überwachung bevorzugt an Unfallschwerpunkten erfolgen, während verdeckte mobile Kontrollen eher an Streckenabschnitten mit hohem Verkehrsaufkommen sinnvoll sind [Zaa94, Cha05, Ric08, Liu11]. Eine erhöhte Verkehrssicherheit äußert sich letztendlich in einer reduzierten Anzahl von Unfällen und einer verminderten Schwere der auftretenden Unfälle. Neben der angewendeten Überwachungsstrategie hat auch die Öffentlichkeitsarbeit entscheidenden Einfluss auf die erzielte Wirkung und Akzeptanz von Geschwindigkeitsüberwachung [Rot88, Mee93, Zaa94, Oei98, Cor99, Pfe01, Pfe02, Mäk03, Ste06, Sor15b, Stu16, Ker17]. Die Ausweitung der Zuständigkeiten für die Überwachungstätigkeiten in Deutschland von der Polizei auf die Kommunen hat dabei vermutlich keinen Einfluss auf die verkehrssichernde Wirkung der Geschwindigkeitsüberwachung [Lut97, Pfe02].

Es existiert bereits ein breites Spektrum an wissenschaftlichen Untersuchungen zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung und deren Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsfluss [Ost90, Zaa94, Gla98, Oei98, Rot99, Mäk03, TRC06, Kal08, Elv09, Erk09]. Diese stützen sich entweder auf Unfallstatistiken, Verkehrsflussmessungen oder Umfragen. In [Lam84, Cam92, Mee93, Mäk94, Rog94, DOT96, Elv97, Lut97, Kru98,

Che00, Kea01, New01, Che02, Dia02, Chr03, Hes03, Hes04, Gai05, Gol05, Hir05, Ste06, Pér07, Cun08, Ric08, Tho08, Tay09, Moo10, Lip12, Car13, Li13, Høy14b, Li15, Li16, Gra17] konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung die Unfallrate am Überwachungsort gesenkt werden kann. Die Unfallratensenkung betrug bei der Mehrzahl der Untersuchungen zwischen 10 % und 50 %. Cameron et al., Meewes, das Speed Camera Demonstration Project in London, Lippold et al. und Høye konnten neben der Unfallratensenkung auch eine Senkung der Unfallschwere nachweisen [Cam92, Mee93, DOT96, Lip12, Høy14b]. In den Beiträgen von Elvik und Stern et al. wurde diese Unfallratensenkung außerdem in Abhängigkeit von der Unfallrate und der Verkehrsdichte betrachtet [Elv97, Ste06]. Aus den zugehörigen Messergebnissen lässt sich schließen, dass die Unfallratensenkung besonders deutlich ausfällt, wenn sich der untersuchte Streckenabschnitt durch eine hohe Unfallrate im Zeitraum vor der Einführung der Geschwindigkeitsüberwachung auszeichnet.

Die Veröffentlichungen von Meewes, Rogerson et al., Christie et al., Li et al. und Hess konnten zeigen, dass die Einführung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung nicht nur die Unfallrate am Überwachungsort selbst reduziert, sondern auch in einem Umkreis von 0,5 km bis 2,5 km um den Überwachungsort herum [Mee93, Rog94, Chr03, Li13, Hes04]. Dies traf insbesondere für Streckenabschnitte zu, auf denen, in der Zeit vor Einführung der Überwachungsmaßnahme, häufig überhöhte Geschwindigkeiten auftraten. In den Arbeiten von Chen et al. und Lippold et al. wurden 8 km bis 22 km lange Streckenabschnitte so ausgerüstet, dass sich für jede Fahrtrichtung ein mittlerer Abstand von 2 km bis 4 km zwischen jeweils zwei benachbarten Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten ergab [Che02, Lip12]. In beiden Veröffentlichungen konnte gezeigt werden, dass auf diesen Streckenabschnitten die Unfallrate mit Hilfe der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung flächendeckend positiv beeinflusst wird.

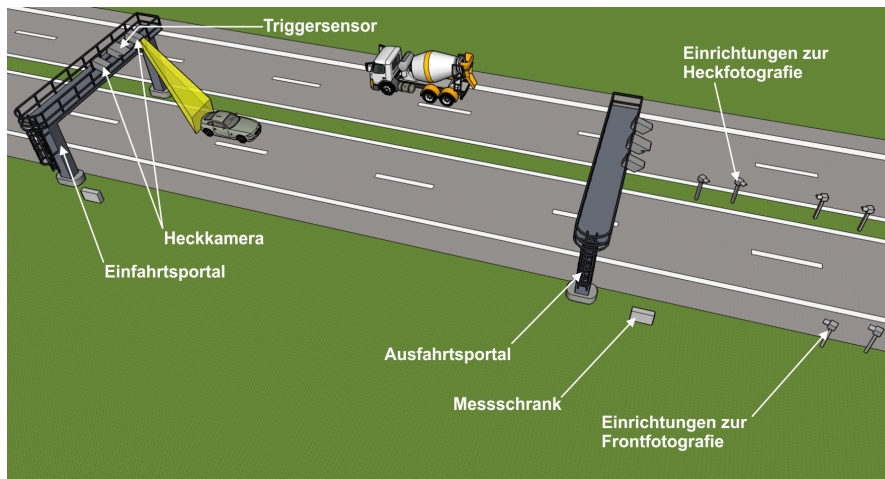
Weitere wissenschaftliche Arbeiten betrachteten die Auswirkungen der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehrsfluss. So konnte zum Beispiel in [Dar76, Sum80, Hau82, Bar84, Lam84, Rot88, Pig89, Roo90, Mee93, Mäk94, Rog94, Waa94, Mac95, Oei96, Ali97, Vaa97, Blo98, Cor99, Sis99, Che00, Kea01, Che02, Kee03, Ret03, Cha05, Gai05, Gol05, Ben08, Cun08, Ret08a, Ric08, Med09, Ben10, Haj11, Liu11, Wal11, Lip12, SC12, Lod13, Sta13, Wil13, Høy14b, Pau14b, Van14, Mar15, Shi15, BG16, Sch16, Woo07] dargelegt werden, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die mittlere Geschwindigkeit und die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten senkt. Der Betrag, um den die mittlere Geschwindigkeit durch die Überwachungsmaßnahmen gesenkt wird, hängt stark vom Überwachungsort, dem Fahrerkollektiv und den geltenden Sanktionen ab. Der Großteil der genannten Veröffentlichungen konnte Reduzierungen zwischen 1 km/h und 10 km/h feststellen. Auf Grund dieser Erkenntnisse wird der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung eine harmonisierende Wirkung auf den Verkehrsfluss zugeschrieben, wie sie bereits auch von Geschwindigkeitsbegrenzungen und Streckenbeeinflussungsanlagen bekannt ist (siehe Abschnitt 2.2.2 und 2.3.2).

Die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit durch die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung resultiert in einer Erhöhung des Befolgungsgrades für die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Dieser erhöhte Befolgungsgrad herrscht – wie die Unfallratensenkung auch – nur in einem bestimmten Umkreis um den Überwachungsort herum vor. Die Ergebnisse von Geschwindigkeitsmessungen in [Dar76, Hau82, Bar84, Cas93, Kee03, Mee93, Cha05, Ben08, Med09, Ben10, Liu11, Rag11, Lip12, SC12, Lod13, Høy14b, Pau14b, Mar15, Shi15, BG16] deuten darauf hin, dass sich dieser Umkreis über 0,5 km bis 3,0 km erstreckt. Auch Teed et al. konnte zeigen, dass die geschwindigkeitssenkende Wirkung der punktuellen Überwachung nur lokal erzielt werden kann (2 bis 5 Meilen) und dass die Ausdehnung des Wirkungsbereichs reduziert wird, wenn Fahrzeugführer Radarwarner oder andere Technik zum Schutz vor Überwachungsmaßnahmen verwenden, weil dann der Überwachungsdruck selbst mit verdeckten Kontrollen nur noch lokal erzeugt werden kann [Tee93b]. Es zeigte sich außerdem, dass Fahrer mit Radarwarnern grundsätzlich zu höheren Geschwindigkeitsübertretungen neigen [Pig89, Tee93a, Tee93b].

Die Wirkung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehr ist nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich begrenzt. Wird die Überwachungsmaßnahme beendet, so steigt das Niveau der gefahrenen Geschwindigkeiten mit fortschreitender Zeit wieder an. Der Zeitraum über den sich dieser Effekt erstreckt (Nachhall) hängt stark von der vorher ausgeübten Überwachungsstrategie ab. Während verdeckte Geschwindigkeitsüberwachung mit bis zu 6 Monaten einen großen Nachhall-Effekt besitzt, fällt dieser bei sichtbarer Überwachung mit bis zu 6 Tagen eher gering aus [Hau82, Nil82, Mee93, Mac95, Blo98, Sis99, Cha05, Haj11, Wal11, Sor15b, Stu16].

In [Hol96, Cor99, Ret08a] wurden Schilder aufgestellt, die allgemein auf eine mögliche Geschwindigkeitsüberwachung hinwiesen. Diese Hinweisschilder führten auch ohne den Einsatz von Geschwindigkeitsüberwachungsmaßnahmen zu reduzierten Geschwindigkeiten, weil damit bereits ein gewisser Überwachungsdruck aufgebaut wurde. Sormes und Stumpen konnten einen solchen Überwachungsdruck und die damit verbundene Absenkung der mittleren Geschwindigkeiten auch bei öffentlichen Ankündigungen von Geschwindigkeitsüberwachungsmaßnahmen in der lokalen Presse und im Internet nachweisen [Sor15b, Stu16]. Wird Geschwindigkeitsüberwachung bereits betrieben, so können zusätzliche Hinweisschilder die Überwachung unterstützen und so die gewünschten Wirkungen verstärken bzw. zu einer erhöhten Akzeptanz der Überwachungsmaßnahme führen [Roo90, Kee03, Ret08a, Lip12]. Die Veröffentlichung von Wilmots et al. zeigt explizit, dass die Geschwindigkeitsüberwachung die mittlere Geschwindigkeit um 5 km/h senkt und dass diese Senkung auf 10 km/h ansteigt, wenn zusätzlich ein Hinweisschild eingesetzt wird [Wil13].

Nicht jede wissenschaftliche Untersuchung konnte die verkehrssichernde Wirkung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung aufzeigen. In [Nov10, Shi15] konnte beispielsweise nicht festgestellt werden, dass die Geschwindigkeitsüberwachung die Unfallrate signifikant senkt. Diese Veröffentlichungen stellen allerdings Ausnahmen dar.



**Abbildung 2.5.:** Schema einer Abschnittskontrolle. Der überwachte Abschnitt erstreckt sich vom Einfahrtsportal bis zum Ausfahrtsportal. Dieser besitzt typischerweise eine Länge von 1 km bis 5 km.

### 2.4.3. Auswirkungen der Abschnittskontrolle auf den Verkehr

Eine in Deutschland erst vor kurzem eingeführte Geschwindigkeitsüberwachungsstrategie ist die der Abschnittskontrolle (Section Control). Die Einführung dieser Überwachung erfolgte in Form eines Pilot-Projektes in Niedersachsen [Bli14, NMI14a, NMI14b, Jen15]. In Abbildung 2.5 wird ein Schema einer solchen Anlage dargestellt. Die Anlage besteht aus einem Einfahrtsportal, einem Ausfahrtsportal, Einrichtungen zur Heck- und Frontfotografie und Messschranken. An den Portalen befinden sich jeweils eine Heckkamera je Fahrspur und ein Sensor zur Triggerung der Heckkameras. Der überwachte Abschnitt erstreckt sich vom Einfahrtsportal bis zum Ausfahrtsportal. Der Abstand zwischen Einfahrts- und Ausfahrtsportal beträgt typischerweise 1 km bis 5 km. Dieser Abstand stellt die Messbasis der Geschwindigkeitsmessung dar. Es handelt sich bei der Abschnittskontrolle daher nicht um ein punktuell arbeitendes Geschwindigkeitsüberwachungsgerät, sondern um eine auf den gesamten Streckenabschnitt bezogene Überwachungsmaßnahme.

Die Anlage zur Abschnittskontrolle erfasst am Einfahrtsportal mit Hilfe des Triggersensors die Fahrzeuge, die in den überwachten Abschnitt hineinfahren. Dabei wird von jedem Fahrzeug ein Heckfoto erstellt. Die Heckfotoerstellung wird mit Hilfe eines Infrarotblitzes unterstützt. Dieser wird in Abbildung 2.5 durch einen gelben Kegel dargestellt. Die Heckfotos werden jeweils mit ihrem zugehörigen Zeitstempel versehen. Am Ausfahrtsportal werden ebenfalls alle Fahrzeuge mit einem Heckfoto und dem zugehörigen Zeitstempel erfasst. Unmittelbar nachdem am Ausfahrtsportal ein Heckfoto erstellt wurde, prüft die Anlage, ob sich ein Fotopaar für Einfahrts- und Ausfahrtsportal finden lässt, in dem jeweils das selbe Fahrzeug abgebildet wird. Für diese Prüfung werden anonymisierte Bildinformationen verwendet, die auf dem jeweiligen Fahrzeugkennzeichen basieren. Konnten

zwei Heckfotos einander zugeordnet werden, bestimmt die Abschnittskontrolle anhand der beiden Zeitstempel der Fotos die Zeitdifferenz zwischen Einfahrt und Ausfahrt für das betreffende Fahrzeug. Mit Hilfe der bekannten Länge des Abschnitts wird dann die Durchschnittsgeschwindigkeit errechnet. Falls die Durchschnittsgeschwindigkeit über dem Bildauslösegrenzwert liegt, wird ein Frontfoto vom jeweiligen Fahrzeug erstellt und die Geschwindigkeitsübertretung entsprechend dokumentiert. Zusätzlich zu dem Frontfoto wird noch ein drittes Heckfoto erstellt, um bei Fahrzeugen mit Anhänger eine eindeutige Messwertzuordnung zu gewährleisten.

In den Niederlanden kam 1994 erstmals eine Pilot-Anlage (Trajectcontrole) zur Abschnittskontrolle zum Einsatz [Bud94]. Seit 2002 wird dort dauerhaft die Abschnittskontrolle betrieben. In der Folgezeit wurden ähnliche Anlagen in Großbritannien, Österreich, Italien, Schweiz, Frankreich, Belgien, Finnland, Norwegen, Spanien, der Tschechischen Republik, Australien und Neuseeland errichtet [Mal97, Oei98, Koy11, Wal12, Soo13]. Der große Vorteil dieser Anlagen gegenüber der punktuellen Überwachung ist, dass sich der Überwachungsdruck über den gesamten überwachten Streckenabschnitt erstreckt.

Die im Betrieb befindlichen Anlagen zur Abschnittskontrolle wurden bereits intensiv wissenschaftlich untersucht. Untersuchungsgegenstand waren die Auswirkungen der Abschnittskontrolle auf die Geschwindigkeitsverteilung der Fahrzeuge, die Unfallrate, die Unfallschwere und die Emissionen des Straßenverkehrs. Es konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der Abschnittskontrolle die mittlere Geschwindigkeit auf dem gesamten Streckenabschnitt um 2 km/h bis 20 km/h gesenkt werden kann und dabei die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten sinkt [Kee03, Ste05, Osr07, Col08, Koy11, Rag11, Wal12, Rag13, Soo13, Høy14b, Kor14, Mae14, Pau14a, Høy15, Mon15, Lah16]. Der Abschnittskontrolle kann somit eine verkehrssichernde und harmonisierende Wirkung zugesprochen werden [Cas11, Koy11, Wal12].

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Hilfe der Abschnittskontrolle auch die Unfallrate, die Unfallschwere und die Emissionen gesenkt werden können. Es konnten Reduzierungen der Unfallrate von 2 % bis 80 % nachgewiesen werden [Kee03, Ste05, Osr07, Cha08, Col08, Mon12, Soo13, Høy14a, Høy14b, Kor14, Høy15, Mon15, Lah16, Owe16, Rob16]. In der Arbeit von Korthof waren diese positiven Effekte nur für Streckenabschnitte nachweisbar, bei denen die Einführung der Abschnittskontrolle von einer Senkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit begleitet wurde [Kor14]. In den Untersuchungen von Charlesworth und Lahrmann et al. wurde jeweils ein Streckenabschnitt in einer ersten Untersuchungsphase mit punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und in einer zweiten Untersuchungsphase mit einer Anlage zur Abschnittskontrolle ausgerüstet. Im Rahmen der ersten Untersuchungsphase konnte in beiden Veröffentlichungen gezeigt werden, dass punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die Verkehrssicherheit erhöht, indem die Unfallrate gesenkt wird. Im Rahmen der zweiten Untersuchungsphase konnte gezeigt werden, dass die Abschnittskontrolle die bereits gesenkte Unfallrate nochmals reduziert und somit einen größeren Beitrag zur Verkehrssicherheit leistet als punktuelle Geschwindigkeitsüber-

wachung [Cha08, Lah16]. Osrael et al., Maerivoet et al. und Robatsch et al. konnten den verkehrssichernden Effekt auch teilweise auf den Streckenabschnitten vor und hinter der Abschnittskontrolle nachweisen [Osr07, Mae14, Rob16]. Die räumliche Ausdehnung der Wirkung der Abschnittskontrolle über den überwachten Abschnitt hinaus wird in der Literatur mit 0 km bis 6 km angegeben [Rag11, Høy14a, Kor14, Pau14a, Mon15]. Zum zeitlichen Nachhall-Effekt bei der Abschnittskontrolle liegen derzeit keine wissenschaftlichen Erkenntnisse vor [Soo13].

Die wissenschaftliche Qualität der existierenden Veröffentlichungen zum Thema Abschnittskontrolle ist sehr unterschiedlich. Einige Veröffentlichungen erscheinen nicht unabhängig erstellt worden zu sein bzw. verzichten in der Bewertung ihrer Ergebnisse auf repräsentative Kontrollgruppen [Wal12, Soo13].

### 2.4.4. Weitere Überwachungskonzepte

Es existieren auch Untersuchungen, die statt des sanktionierenden Überwachungskonzeptes, wie es aktuell praktiziert wird, ein belohnendes Überwachungskonzept favorisieren [Koo91, Zaa94, Mac95, Koß96, Hag99]. Als Vorteil des Belohnungskonzeptes wird dort angeführt, dass belohntes Handeln einen Lerneffekt nach sich zieht, während ein bestrafendes Konzept erlerntes Verhalten unterdrückt und diese Unterdrückung zeitlich und räumlich an die Überwachungsmaßnahme gekoppelt ist. Der Nachteil eines belohnenden Konzeptes ist, dass es in der Praxis nur mit sehr hohem Aufwand umsetzbar ist.

## 2.5. Zusammenfassung zum Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel wurden die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung des Verkehrs mit Hilfe von Verkehrsmodellen vorgestellt. Dabei wurden verschiedene mikroskopische und makroskopische Verkehrsmodelle näher erörtert, weil die Parameter dieser Modelle für die Verkehrsflussmessungen dieser Arbeit und die Betrachtung der Verkehrssicherheit relevant sind.

Außerdem wurden hier die bereits existierenden Erkenntnisse zu den Auswirkungen von Geschwindigkeitsbegrenzungen, WVA und Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit dargelegt. Alle drei Maßnahmen führen demnach zu reduzierten mittleren Geschwindigkeiten und reduzierten Geschwindigkeitsdifferenzen. In der Literatur wird daher diesen drei Maßnahmen eine verkehrsflussharmonisierende und verkehrssichernde Wirkung zugesprochen. Die verkehrssichernde Wirkung wird dabei meist anhand reduzierter Unfallraten und einer reduzierten Unfallschwere aufgezeigt.

Der aktuelle Stand der Wissenschaft enthält nur grobe Anhaltspunkte darüber, wie sich der Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort bzw. am Einfahrts- und Ausfahrtsportal einer Abschnittskontrolle verändern. Zudem beurteilen die existierenden Arbeiten meist nur das gesamte Fahrerkollektiv und

machen wenige Aussagen zum detaillierten Verhalten einzelner Fahrzeugführer. Um die Verkehrssicherheit mit Hilfe der Geschwindigkeitsüberwachung effektiv zu erhöhen, ist es aber wichtig zu wissen, welche Fahrmanöver am Überwachungsort bzw. am Einfahrts- und Ausfahrtsportal einer Abschnittskontrolle auftreten und wie häufig diese vorkommen. Für die Bearbeitung dieses bestehenden Forschungsbedarfs dienen in dieser Arbeit die Forschungsfragen 1 bis 5 des Themenschwerpunkts I (siehe auch Abschnitt 1.2).

Der Stand der Wissenschaft zeigt, dass die Wirkungen von WVA und punktueller Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit – jeweils getrennt voneinander – bereits ausgiebig wissenschaftlich untersucht wurden. Im Gegensatz dazu sind die Wirkungen der Kombination beider Maßnahmen bisher wissenschaftlich nicht eingehend untersucht worden. Mit Hilfe der Forschungsfragen 6 und 7 (Themenschwerpunkt II) liefert diese Arbeit daher erstmals belastbare Erkenntnisse zum Einfluss der Kombination beider Maßnahmen auf den Verkehr (siehe auch Abschnitt 1.2). Mit Hilfe dieser Erkenntnisse können beide Maßnahmen zukünftig besser aufeinander abgestimmt werden.

In Deutschland wird die Abschnittskontrolle in Form eines Pilot-Projektes erst seit kurzem betrieben. Von im Ausland betriebenen Anlagen zur Abschnittskontrolle ist bereits bekannt, dass diese den Überwachungsdruck auf den gesamten Streckenabschnitt ausdehnen und so die örtlichen Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver minimieren. Diese beiden Aspekte werden häufig als Vorteil der Abschnittskontrolle gegenüber der punktuellen Überwachung genannt, wobei in den existierenden Veröffentlichungen ein direkter Vergleich zwischen beiden Überwachungsmethoden nur schwer möglich war, weil meist unterschiedliche Streckenabschnitte mit einander verglichen werden mussten. Mit Hilfe der Forschungsfragen 8 und 9 (Themenschwerpunkt III) untersucht diese Arbeit die Einführung der Abschnittskontrolle in Deutschland im Bezug auf die Fahrmanöver und den Verkehrsfluss (siehe auch Abschnitt 1.2). Diese wissenschaftliche Untersuchung wird zeigen, ob sich die Vorteile der Abschnittskontrolle auch hier in Deutschland nachweisen lassen. Dazu wird ein direkter Vergleich zwischen Abschnittskontrolle und punktueller Überwachung auf demselben Streckenabschnitt stattfinden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden relevant sein für die weitere Verbreitung der Abschnittskontrolle in Deutschland.



### 3. Untersuchungsmethoden

In diesem Kapitel werden die Untersuchungsmethoden beschrieben, die in dieser Arbeit zum Einsatz kamen. Außerdem werden hier die untersuchten Streckenabschnitte vorgestellt. Damit wird in diesem Kapitel die Herangehensweise transparent gemacht, mit der die formulierten Forschungsfragen bearbeitet wurden. Statistische Aspekte, die für die Auswertung der Messdaten relevant waren, werden im Anhang C aufgeführt.

Für die Untersuchung des Verkehrsflusses und der Fahrmanöver der einzelnen Autofahrer wurden verdeckte Verkehrsflussmessungen eingesetzt. Mit einer begleitenden Umfrage wurde untersucht, inwiefern sich die von den Fahrzeugführern getroffenen Aussagen zum Geschwindigkeitsverhalten und dessen Überwachung in den Verkehrsflussdaten wiederfinden lassen. Dieser Vergleich liefert zusätzliche Erkenntnisse zum Fahrverhalten im Überwachungsfall.

Für die Betrachtung der Verkehrssicherheit wurde in dieser Arbeit nicht auf Unfallstatistiken zurückgegriffen, da diese stark von jahreszeitlichen Schwankungen und zufälligen Ereignissen beeinflusst werden. Stattdessen wurden hier für die Betrachtung der Verkehrssicherheit sogenannte Surrogate Safety Measures verwendet. Nachteilig bei dieser Herangehensweise ist, dass umfassende Unfallstatistiken für die Betrachtung der Verkehrssicherheit aussagekräftiger sind als Surrogate Safety Measures. Während aber Unfallstatistiken nur auf langen Zeitskalen ( $\geq 3$  Jahre) statistisch aussagekräftige Werte erlangen, ist dies bei Surrogate Safety Measures bereits auf sehr kurzen Zeitskalen ( $\leq 1$  Tag) der Fall [Ozb08, Yan12]. Kurze Untersuchungszeiträume haben den Vorteil, dass die Ergebnisse nicht von Entwicklungen auf dem Gebiet der Verkehrssicherheit und allgemeinen Änderungen des Verkehrsflusses verfälscht werden. Außerdem können mit kurzen Untersuchungszeiträumen kritische Streckenabschnitte schnell erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Im Folgenden werden nun die bei den Verkehrsflussmessungen eingesetzte Sensorik, die untersuchten Streckenabschnitte, die Umfragemethoden und die verwendeten Surrogate Safety Measures vorgestellt. Im Kapitel 5 und im Anhang A werden die Verkehrsflussmessungen ausgewertet und die Ergebnisse diskutiert. Die Auswertung der Umfrage befindet sich im Kapitel 4 und im Anhang B.

## 3.1. Messung des Verkehrsflusses

Es existieren zahlreiche Parameter, die den Verkehrsfluss beschreiben (siehe Abschnitt 2.1). Ebenso zahlreich sind daher auch die Erfassungs- und Auswertemethoden. In [Bäu10, FSV10, FSV12] wurden bereits umfangreiche Hinweise zur Verkehrsdatenerfassung und -auswertung veröffentlicht. Diese Hinweise dienten in dieser Arbeit als Richtlinien.

Um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Verkehrsflussmessungen zu gewährleisten, wurde versucht alle Faktoren konstant zu halten, die die Wirkung der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Fahrmanöver und den Verkehrsfluss – und damit auch auf die Verkehrssicherheit – beeinflussen können. Es wurden deshalb nur Untersuchungszeiträume betrachtet in denen ein stabiler und freier Verkehrszustand vorlag und in denen weder Starkregen noch Glätte den Verkehr behinderten. Weiterhin wurden nur Werktage tagsüber in der ferienfreien Zeit betrachtet, um den Anteil von ortskundigen Fahrern sowie den Anteil des Schwerlastverkehrs relativ konstant zu halten – für den jeweiligen Streckenabschnitt.

### 3.1.1. Sensorik

Für Verkehrsflussmessungen können viele verschiedene Erfassungsmethoden verwendet werden. Die klassischste Methode basiert dabei auf feststehenden Sensoren, die den Verkehrsfluss lokal erfassen. Andere Methoden benutzen hingegen die in und an den Fahrzeugen vorhandenen Funkeinrichtungen (Mobiltelefone, Reifendrucksensoren, GNSS-Empfänger, ...), um Rückschlüsse auf den Verkehrsfluss zu ziehen. Die verschiedenen Erfassungsmethoden für Verkehrsflussmessungen wurden vor Beginn der Untersuchungen bewertet, hinsichtlich ihrer Eignung die gestellten Forschungsfragen zu beantworten. Dabei wurde festgestellt, dass für die vorliegende Arbeit feststehende Sensoren am Besten geeignet sind, weil diese die höchsten Detektionsraten versprechen.

Als feststehende Sensoren kamen verschiedene Arten von Sensoren (Radarsensor, Lasersensor, Induktionsschleife, Kamera, ...) in Betracht. Diese wurden eingehend hinsichtlich ihrer messtechnischen Eigenschaften und dem Automatisierungsgrad bei der Auswertung der Messdaten untersucht. Letztendlich zeigte sich, dass sogenannte Trackingradarsensoren für die hier gestellten messtechnischen Aufgaben am besten geeignet sind, weil deren Messdaten die Fahrmanöver sehr detailliert beschreiben und sie die Änderungen des Verkehrsflusses mit einer sehr hohen örtlichen Auflösung erfassen. Neben den Trackingradarsensoren wurden auch teilweise die bereits vorhandenen Sensoren der WVA genutzt, weil diese die Möglichkeit bieten den Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts zu betrachten.

Eine weitere häufig genutzte Methode zur Erfassung des Verkehrsflusses und der Fahrmanöver ist die des Mitfahrens/Nachfahrens im Fahrzeugstrom mit Hilfe eines Versuchsfahrzeugs. Diese Methode kam hier nicht zur Anwendung. Die Messdaten von Nachfolge-

fahrten bieten zwar eine gute örtliche Auflösung für den Verkehrsfluss und ermöglichen auch Rückschlüsse auf die Fahrmanöver, die Messdatenerfassung und -auswertung ist bei Nachfolgefahrten allerdings zu aufwändig, um daraus im gesetzten zeitlichen Rahmen zu statistisch verlässlichen Aussagen zu kommen.

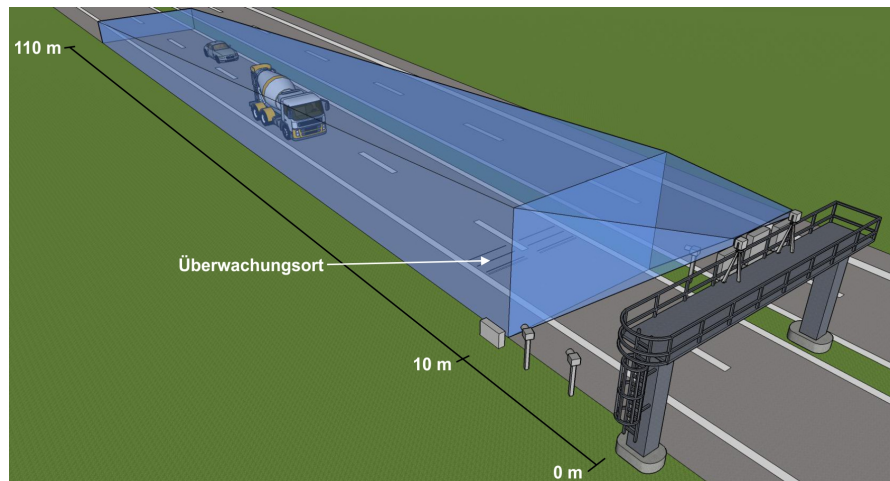
### Trackingradar

Der in dieser Arbeit bevorzugt eingesetzte Trackingradarsensor wurde von der Firma JEN-OPTIK Robot GmbH speziell für die Verkehrsüberwachung entwickelt [Leh13]. Dieser Sensor strahlt Mikrowellen auf mehreren Frequenzen in einem Frequenzband bei 24 GHz aus. Die ausgesendeten Mikrowellen können über Reflexionszentren, die sich innerhalb des Erfassungsbereichs befinden, zurück zum Trackingradar gelangen und dort empfangen werden. Wenn sich die Reflexionszentren bewegen, besitzen die empfangenen Mikrowellen eine gegenüber den ausgesendeten Mikrowellen verschobene Frequenz (Dopplereffekt). Diese Frequenzverschiebung ist proportional zur Geschwindigkeit des jeweiligen Reflexionszentrums, so dass daraus dessen Geschwindigkeit bestimmt werden kann. Neben der Geschwindigkeit wird auch die Entfernung zum Reflexionszentrum berechnet. Die Entfernungsinformation verbirgt sich in der Phasenverschiebung, die zwischen Mikrowellen verschiedener Sendefrequenzen besteht.

Das Trackingradar besitzt eine Patch-Antenne zum Senden und Empfangen der Mikrowellen. Die räumliche Ausdehnung dieser Patch-Antenne führt zu einer Phasenverschiebung zwischen den Empfangssignalen. Diese Phasenverschiebung ist ein Maß für den Winkel zum jeweiligen Reflexionszentrum. Das Trackingradar ist somit in der Lage die Geschwindigkeiten, Entfernungen und Winkel aller erkannten und bewegten Reflexionszentren zu bestimmen.

Die am Trackingradar vorbeifahrenden Fahrzeuge besitzen mehrere Reflexionszentren. Um die Geschwindigkeiten dieser Fahrzeuge zu bestimmen, fasst das Trackingradar daher benachbarte Reflexionszentren zu Objekten zusammen. Die empfangenen Mikrowellen werden kontinuierlich analysiert, so dass ständig neue Objektinformationen gesammelt werden und die Objekte bis zum Verlassen des Erfassungsbereichs verfolgt werden können. Dieses Verfahren wird auch als Tracking bezeichnet. Der Erfassungsbereich des Trackingradars erstreckt sich über ca. 100 m (Abbildung 3.1).

Für jedes detektierte Fahrzeug können in zeitlichen Abständen von etwa 100 ms die Fahrzeugposition und die Fahrzeuggeschwindigkeit vom Trackingradar abgefragt werden. Mit Hilfe eines angeschlossenen Laptops können diese mikroskopischen Parameter des Verkehrsflusses mit einem Zeitstempel versehen und abgespeichert werden. Am Ende einer Messreihe liegen somit für jedes Fahrzeug detaillierte Positions-, Zeit- und Geschwindigkeitsdaten vor. Aus diesen mikroskopischen Parametern können Rückschlüsse auf die durchgeführten Fahrmanöver gezogen werden. Außerdem ermöglichen diese mikroskopischen Parameter die Bestimmung der makroskopischen Parameter mittlere lokale Geschwindigkeit  $\bar{v}$ , Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilung  $\sigma_v$  und Verkehrs-



**Abbildung 3.1.:** Schema des Erfassungsbereichs für auf einem Anzeigequerschnitt installierte Trackingradarsensoren. Der Erfassungsbereich wird hier durch den blau-transparenten Bereich visualisiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Trackingradarsensoren hier vergrößert dargestellt.

stärke  $Q$ . Anhand der Positionsinformationen ist außerdem eine Fahrspurklassifizierung für diese makroskopischen Parameter des Verkehrsflusses möglich. Eine zuverlässige Fahrzeugklassifizierung bietet das Trackingradar nicht.

Der Trackingradarsensor ist transportabel einsetzbar und kann an beliebigen Streckenabschnitten in Betrieb genommen werden. Dafür ist dieser auf einem entsprechenden Stativ zu montieren. Die messtechnischen Eigenschaften des Trackingradars wurden bereits ausgiebig validiert. Es konnte insbesondere festgestellt werden, dass bezüglich der Geschwindigkeitsmessung das Trackingradar die in der Anlage 18-11 der Eichordnung definierten Genauigkeitsanforderungen erfüllt [EiO88, Kup15].

#### Sensoren der WVA

Neben dem Trackingradarsensor wurden bei den Verkehrsflussmessungen teilweise auch Sensoren der WVA verwendet. Dabei handelte es sich entweder um Doppelinduktionsschleifen oder Überkopfradarsensoren. Die Sensoren der WVA bestimmen von jedem vorbeifahrendem Fahrzeug die aktuelle Geschwindigkeit, die aktuelle Zeitlücke zum Vordermann und die Fahrzeugklasse. In der jeweils zugehörigen Streckenstation werden diese Einzelfahrzeugdaten mittels Aggregation und Mittelwertbildung in die makroskopischen Parametern des Verkehrsflusses umgerechnet. Die Mittelwertbildung erfolgt fahrspur-selektiv jeweils für alle Fahrzeuge, die in einer Minute den jeweiligen Sensor passieren. Nach der Umrechnung werden die Daten an die VRZ übertragen und dort abgespeichert. Von der VRZ können diese Daten für ausgewählte Untersuchungszeiträume abgerufen werden. Die jeweils zur Verfügung gestellten Daten unterscheiden sich in ihrem Umfang

zwischen den verschiedenen WVA. Neben der Verkehrsstärke  $Q$  und der mittleren lokalen Geschwindigkeit  $\bar{v}_l$  sind teilweise auch die mittlere Zeitlücke aufeinanderfolgender Fahrzeuge  $t_{\text{brutto}}$ , die Standardabweichung der Geschwindigkeiten  $\sigma_v$ , die 85%-Geschwindigkeit  $v_{85}$ , die von 85% der Fahrzeuge nicht überschritten wird, und der Belegungsgrad  $b$  der Sensormessbasis abrufbar.

Im Gegensatz zum Trackingradar bieten die Sensoren der WVA damit nicht die Möglichkeit Einzelfahrzeugdaten auszugeben. Die Sensoren der WVA haben aber gegenüber dem Trackingradar den Vorteil, dass diese eine Fahrzeugklassifizierung vornehmen. So können alle von der WVA abgerufenen Daten nach verschiedenen Fahrzeugklassen unterschieden werden.

In den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen wurden die Genauigkeitsanforderungen für die Sensoren der WVA bezüglich der Geschwindigkeitsmessung definiert. Diese sind identisch mit denen der Anlage 18-11 der Eichordnung [EiO88, TLS12]. Trackingradarsensoren und die Sensoren der WVA halten somit nominell dieselben Fehlergrenzen ein.

### 3.1.2. Untersuchte Streckenabschnitte

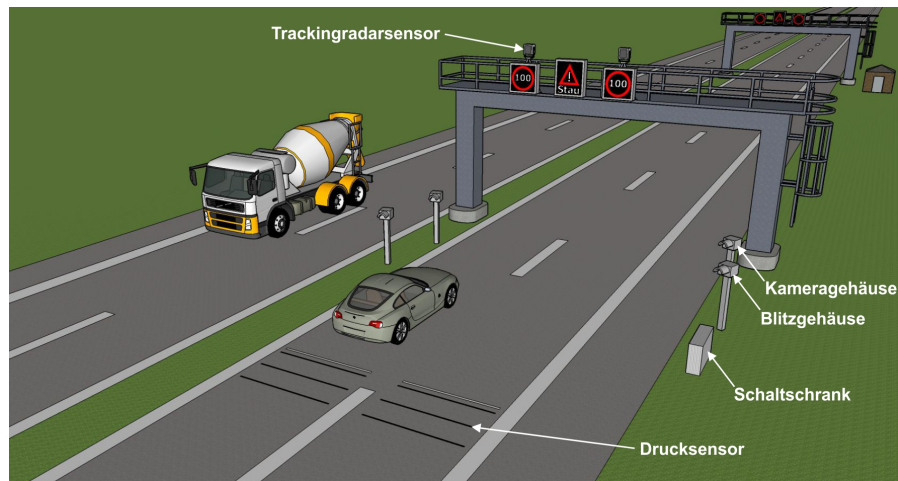
Im Fokus der Untersuchungen standen Streckenabschnitte in Deutschland auf denen Geschwindigkeitsüberwachung in Kombination mit WVA betrieben wird und der erste Streckenabschnitt Deutschlands, der mit einer Abschnittskontrolle überwacht wird.

Die untersuchten Streckenabschnitte wiesen pro Fahrtrichtung 2 bis 3 Fahrspuren auf. Die in Fahrtrichtung gesehen rechte Fahrspur wird in dieser Arbeit immer als Normalspur bezeichnet – die linke Fahrspur immer als Überholspur. Falls 3 Fahrspuren vorhanden sind, wird die mittlere Fahrspur als Mittelspur bezeichnet.

#### Geschwindigkeitsüberwachung in Kombination mit WVA

Streckenabschnitte, auf denen Geschwindigkeitsüberwachung in Kombination mit WVA durchgeführt wird, befinden sich in Deutschland auf folgenden Autobahnen:

- A1 bei Bremen,
- A2 zwischen Helmstedt und Hannover,
- A3 bei Köln,
- A71 zwischen Ilmenau und Suhl,
- A100 in Berlin,
- A8, A9, A92, A94, A99 in Bayern.



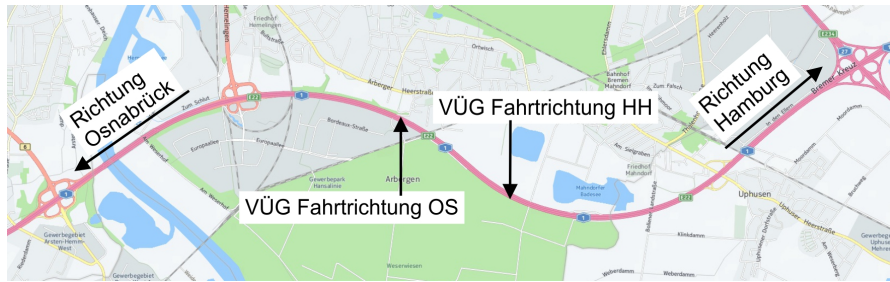
**Abbildung 3.2.:** Schema eines Überwachungsortes mit auf dem Anzeigequerschnitt installierten Trackingradarsensoren. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Trackingradarsensoren hier vergrößert dargestellt. Das hier dargestellte Geschwindigkeitsüberwachungsgerät besteht aus mehreren Komponenten (Drucksensoren, Blitzgehäuse, Kameralinse, Schaltkasten).

Nicht alle dieser Streckenabschnitte und Überwachungsorte waren auf Grund ihrer baulichen Gegebenheiten für die hier zur Verfügung stehenden Messmittel geeignet. Es wurden im Rahmen dieser Dissertation deshalb die folgenden Überwachungsorte betrachtet. Auf der A1 bei Bremen wurden zwei Überwachungsorte untersucht. Auf der A2 wurden die Verkehrsflussmessungen an einem Überwachungsort in der Nähe von Braunschweig durchgeführt. Auf der A3 bei Köln wurde ein Überwachungsort betrachtet und auf der A71 in der Nähe von Suhl zwei Überwachungsorte.

Die auf den Streckenabschnitten mit WVA untersuchten Überwachungsorte haben die Gemeinsamkeit, dass sich die Komponenten des Überwachungsgerätes in der unmittelbaren Umgebung zu einem Anzeigequerschnitt der WVA befinden. An jedem dieser Überwachungsorte wurden 2 Trackingradarsensoren temporär auf dem jeweiligen Anzeigequerschnitt montiert. Bei dieser Montage kamen Stative zum Einsatz.

Es wurden immer 2 Trackingradarsensoren eingesetzt. Die beiden Sensoren wurden so justiert, dass ein Sensor den Fernbereich und der andere Sensor den Nahbereich des möglichen Erfassungsbereiches abdeckte. Im Vergleich zum Messeinsatz mit einem einzelnen Sensor konnte auf diese Weise eine bessere Detektionsrate erzielt werden. Auf Grund des großen Öffnungswinkels der Trackingradarsensoren waren diese jeweils in der Lage den Verkehrsfluss von allen Fahrspuren gleichzeitig zu erfassen (Abbildung 3.1).

Die Stative der Trackingradarsensoren wurden für die Autofahrer im ankommenden Verkehr meist durch die WZG verdeckt, so dass nur die Sensoren selbst sichtbar waren. Auf



**Abbildung 3.3.:** Kartenansicht der A1 bei Bremen. Die beiden Überwachungsorte (VÜG) wurden kenntlich gemacht.

Grund ihrer kleinen Abmessungen ( $12\text{ cm} \times 14\text{ cm}$ ) fügten sich die Trackingradarsensoren sehr gut in das Bild der auf dem Anzeigequerschnitt dauerhaft montierten Komponenten ein. Die Trackingradarsensoren waren somit für die Autofahrer in jedem Fall nur schwer erkennbar. Die Sensoren der WVA waren entweder in der Fahrbahn verbaut oder dauerhaft am Anzeigequerschnitt befestigt. Diese waren daher entweder für die Autofahrer nicht sichtbar oder wurden auf Grund ihrer dauerhaften Befestigung von den Autofahrern nicht mehr wahrgenommen. Auf Grund dieser Gegebenheiten konnten die Verkehrsflussmessungen auf den Streckenabschnitten mit WVA verdeckt durchgeführt werden. Auf die Messdaten der Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte wurde in dieser Arbeit nicht zurückgegriffen.

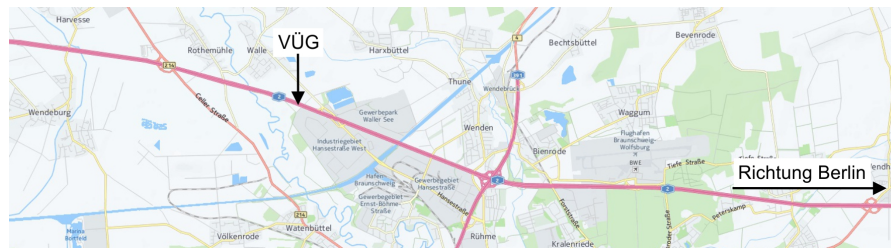
In Abbildung 3.2 wird ein für diese Arbeit typischer Überwachungsart schematisch dargestellt. Neben den Komponenten des stationäres Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes (Drucksensoren, Blitzgehäuse, Kamergehäuse, Schaltschrank) sind die auf dem Anzeigequerschnitt installierten Trackingradarsensoren gut sichtbar. Der typische Erfassungsbereich dieser Trackingradarsensoren für den ankommenden Verkehr wird in Abbildung 3.1 separat in einer transparenten Form dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in beiden Abbildungen die Trackingradarsensoren vergrößert dargestellt.

### A1 bei Bremen

Die A1 bei Bremen (Abbildung 3.3) verläuft durch ebenes Gelände. Sie wird umgeben von typischer Stadtrandbebauung und Feldern. Der Streckenverlauf ist durch 2 langgezogene Kurven mit einem Kurvenradius größer 1000 m geprägt. Die beiden Fahrrichtungen sind durch einen Grünstreifen und Leitplanken baulich von einander getrennt worden. Die Fahrbahnrande wurden mit Leitplanken versehen. Auf dem betrachteten Streckenabschnitt werden beide Fahrrichtungen (Fahrtrichtung Hamburg und Fahrtrichtung Osnabrück) an jeweils einem Ort punktuell überwacht. In jeder Fahrtrichtung stehen den Autofahrern 3 Fahrstreifen und 1 Seitenstreifen zur Verfügung. Die mittlere Verkehrsstärke pro Fahrtrichtung beträgt tagsüber etwa 3400 KFZ/h.

### 3. Untersuchungsmethoden

---



**Abbildung 3.4.:** Kartenansicht der A2 bei Braunschweig. Der Überwachungsort (VÜG) wurde kenntlich gemacht.

Die WZG auf der A1 sind Tag und Nacht eingeschaltet. Die maximal angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt auf dem gesamten Streckenabschnitt 120 km/h. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wird im Falle der Detektion von Störungen im Verkehrsfluss oder bei einer zu großen Verkehrsstärke reduziert.

Die beiden untersuchten Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte befinden sich jeweils am Fuße eines Anzeigequerschnitts der WVA. Die zugehörigen Kameras sind oben auf dem jeweiligen Anzeigequerschnitt angebracht. Die Blitzgehäuse stehen gut sichtbar für die Verkehrsteilnehmer links der Fahrbahn auf dem Grünstreifen. Es wird nicht mit Hinweisschildern auf die Überwachungssituation aufmerksam gemacht. Früher waren hier aber Hinweisschilder im Einsatz.

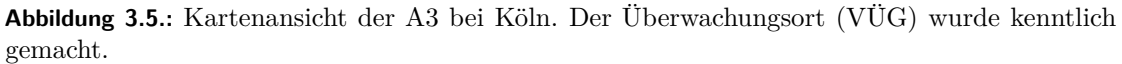
#### A2 bei Braunschweig

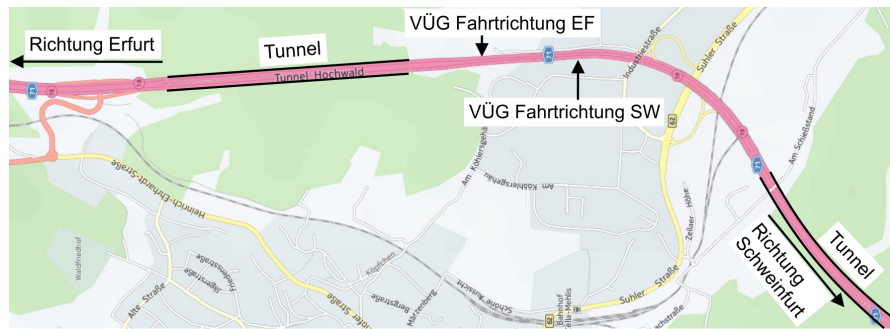
Der untersuchte Abschnitt der A2 bei Braunschweig (Abbildung 3.4) verläuft durch ebenes Gelände. Die Autobahn wird umgeben von dörflicher Bebauung, Gewerbegebieten, und Feldern. Die A2 verläuft in diesem Abschnitt fast ausschließlich geradeaus. Ein Grünstreifen und Leitplanken sorgen für die bauliche Trennung der beiden Fahrtrichtungen. Die Fahrbahnrande sind ebenfalls mit Leitplanken versehen worden. Auf dem betrachteten Streckenabschnitt wird nur die Fahrtrichtung Berlin an einem Ort punktuell überwacht. In dieser Fahrtrichtung stehen den Autofahrern 3 Fahrstreifen und 1 Seitenstreifen zur Verfügung. Die mittlere Verkehrsstärke pro Fahrtrichtung beträgt tagsüber etwa 3000 KFZ/h.

Die WZG auf der A2 sind tagsüber meist aktiviert und nachts meist deaktiviert. In den Zeiten, in denen die WZG deaktiviert sind, gilt keine zulässige Höchstgeschwindigkeit. Bei großer Verkehrsdichte oder bei Störungen im Verkehrsfluss werden die WZG eingeschaltet. Dann gilt maximal eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h, die situationsabhängig reduziert werden kann.

Das untersuchte Geschwindigkeitsüberwachungsgerät befindet sich in unmittelbarer Umgebung zu einem Anzeigequerschnitt der WVA. Die zugehörigen Kamera- und Blitzge-







**Abbildung 3.6.:** Kartenansicht der A71 bei Suhl. Die beiden Überwachungsorte (VÜG) wurden kenntlich gemacht.

#### A71 bei Suhl

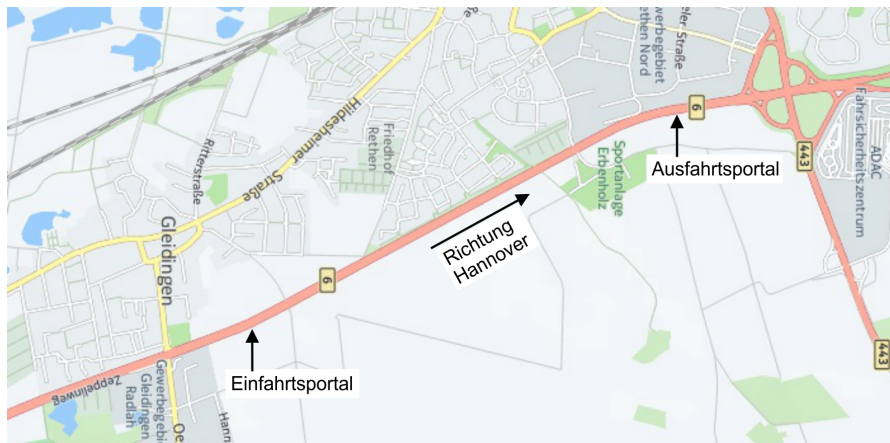
Die A71 bei Suhl ist geprägt von Tunneln und Brücken (Abbildung 3.6). Der Streckenverlauf ist kurvig und hügelig – das umgebende Gelände bergig und dicht bewaldet. Beide Fahrtrichtungen sind mittels Grünstreifen und Leitplanken baulich getrennt worden. Die Fahrbahnrande sind hier auch mit Leitplanken versehen worden. Auf dem betrachteten Streckenabschnitt werden beide Fahrtrichtungen (Fahrtrichtung Erfurt und Fahrtrichtung Schweinfurt) an jeweils einem Ort punktuell überwacht. In jeder Fahrtrichtung stehen den Autofahrern 2 Fahrstreifen und 1 Seitenstreifen zur Verfügung. Die mittlere Verkehrsstärke pro Fahrtrichtung beträgt tagsüber etwa 900 KFZ/h.

Die WZG auf der A71 sind Tag und Nacht eingeschaltet. Die maximal angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt auf dem gesamten Streckenabschnitt 80 km/h. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wird im Falle eines gestörten Verkehrsflusses reduziert. Die Verkehrsstärke erreicht für gewöhnlich keinen kritischen Wert, an dem die zulässige Höchstgeschwindigkeit reduziert werden müsste.

Die beiden untersuchten Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte befinden sich jeweils am Fuße eines Anzeigequerschnitts der WVA. Die zugehörigen Kameras sind oben auf dem jeweiligen Anzeigequerschnitt angebracht. Die Blitzgehäuse stehen gut sichtbar für die Verkehrsteilnehmer links und rechts am Fahrbahnrand. Es wird mit Hinweisschildern ohne Entfernungsangabe auf die Überwachungssituation hingewiesen.

#### Abschnittskontrolle

Der Streckenabschnitt, auf dem die Abschnittskontrolle erstmals in Deutschland eingeführt wurde, ist Teil der B6 bei Hannover. Die Trackingradarsensoren wurden auf diesem Streckenabschnitt entweder vom Straßenrand aus oder vom Einfahrts- bzw. Ausfahrtportal der Abschnittskontrolle aus betrieben. Für den Einsatz vom Straßenrand aus, wurden die Sensoren auf Stativen montiert und immer so aufgestellt, dass diese für die



**Abbildung 3.7.:** Kartenansicht der B6 bei Hannover. Die Standorte von Einfahrts- und Ausfahrtsportal wurden kenntlich gemacht.

ankommenden Autofahrer nicht sichtbar waren. Für den Betrieb auf dem Einfahrts- bzw. Ausfahrtsportal wurden die Trackingradarsensoren direkt in die dort vorhandenen Komponenten integriert und waren somit als einzelne Sensoren nicht erkennbar. Auf diese Weise konnten auch auf der B6 verdeckte Verkehrsflussmessungen durchgeführt werden.

Die Kartenansicht des mit der Abschnittskontrolle ausgestattete Streckenabschnitts wird in Abbildung 3.7 dargestellt. Die Abschnittskontrolle überwacht nur die Fahrtrichtung Hannover. Die Überwachung findet auf einer Länge von ca. 2,2 km statt. Der Streckenabschnitt erstreckt sich durch leicht hügeliges Gelände zwischen Feldern und typischer Stadtrandbebauung. Die Fahrbahn verläuft größtenteils geradeaus. Beide Fahrtrichtungen sind mit Hilfe von Betonelementen baulich von einander getrennt worden. Ein Grünstreifen zwischen beiden Fahrtrichtungen existiert nicht. An den Fahrbahnrandern sind teilweise Leitplanken vorhanden. Jede Fahrtrichtung verfügt über 2 Fahrstreifen. Seitenstreifen stehen nicht zur Verfügung. Die mittlere Verkehrsstärke pro Fahrtrichtung beträgt tagsüber etwa 900 KFZ/h

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 100 km/h. Diese wird vor und auf dem Streckenabschnitt mittels einer festen Beschilderung angezeigt.

Das Einfahrts- und das Ausfahrtsportal inklusive Messtechnik sind für die Autofahrer sehr gut sichtbar. 50 m hinter dem Ausfahrtsportal befinden sich 3 gut sichtbare Kamergehäuse und zusätzlich 3 gut sichtbare Blitzgehäuse. Am Beginn des Streckenabschnitts befindet sich eine Kreuzung mit einer Lichtzeichenanlage. Am Ende des Streckenabschnitts befindet sich ein Verkehrsknoten.

## 3.2. Umfrage

Neben den Verkehrsflussmessungen wurde eine Umfrage zum Geschwindigkeitsbewusstsein der Autofahrer und deren Verhalten im Überwachungsfall – insbesondere für Streckenabschnitte mit WVA – durchgeführt. Im Folgenden wird die durchgeführte Umfrage kurz vorgestellt werden. Im Anhang D werden alle Fragen und Antwortmöglichkeiten der Umfrage detailliert aufgelistet.

Die Umfrage war online über die Internetseiten der PTB etwa zwei Jahre (Mai 2013 – Juni 2015) lang zugänglich. Der Link zur Umfrage wurde bei Vorträgen, bei öffentlichen Veranstaltungen, in schriftlichen Veröffentlichungen, über Mailverteiler, Flyer und soziale Netzwerke gestreut, so dass möglichst viele Autofahrer aller Altersstufen im Teilnehmerfeld vertreten waren.

Die Umfrage umfasste die Themen Geschwindigkeitsverhalten, Geschwindigkeitsüberwachung und WVA. Die Teilnehmer der Umfrage wurden durch einen Einführungsteil mit dem Thema vertraut gemacht, bevor die Fragenkomplexe begannen. Insgesamt bestand die Umfrage aus 19 Fragen. Fragen, bei denen die Teilnehmer ihre Zustimmung oder die Häufigkeit einer Verhaltensweise zum Ausdruck bringen mussten, wurden immer mit 5 Antwortmöglichkeiten versehen, damit immer eine neutrale Antwortmöglichkeit bestand. Die Umfrage wurde so programmiert, dass die Teilnehmer bei jeder Frage genau eine Antwort geben mussten – abgesehen von einigen Ausnahmen bei denen Mehrfachantworten erlaubt wurden. Mit Hilfe von Cookies wurden Mehrfachteilnahmen erschwert.

Gegenüber den Verkehrsflussmessungen bietet die Umfrage den Vorteil, dass sie einen Einblick in sonst unzugängliche Informationen bezüglich des Fahrverhaltens der Autofahrer gewährt. Bei der Bewertung der gewonnenen Informationen muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Verteilung der Antworthäufigkeiten einen subjektiven Faktor der Befragten trägt. In Umfragen sind die Befragten gern bestrebt, sozial akzeptierte Antworten zu wählen. Dies ist insbesondere bei Umfragen der Fall, die im persönlichen Interview geführt werden. Da die vorliegende Umfrage online und anonym durchgeführt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt hier einen geringen Einfluss auf die Verteilung der Antworthäufigkeiten hatte.

## 3.3. Bestimmung von Surrogate Safety Measures

Wie bereits erwähnt wird unter dem Begriff Surrogate Safety Measures (SSM) eine Vielzahl von Sicherheitsindikatoren zusammengefasst. Sie dienen als Hilfsmaß zur Beschreibung der Kritikalität von Verkehrssituationen. SSM stellen somit einen Zusammenhang zwischen der Verkehrssicherheit und der Verkehrssituation her [Min01, Get08, Tar09, Tho14]. Im Gegensatz zur Unfallhäufigkeit, welche die Verkehrssicherheit direkt beschreibt, stellen SSM ein indirektes Maß für die Verkehrssicherheit dar. Es sei hier angemerkt, dass wissenschaftliche Arbeiten bereits die Verknüpfung von SSM mit

der Verkehrssicherheit zeigen konnten, aber noch weiterer Forschungsbedarf besteht [Ozb08, Tar09, Yan12].

Bekannte SSM sind beispielsweise die Zeit bis zur Kollision (Time-To-Collision, TTC), die Zeitlücke aufeinanderfolgender Fahrzeuge (Time Headway, THW), die Zeit bis zur letztmöglichen Einleitung einer Notbremsung (Time to Last Second Breaking, TLSB) und die Zeit bis zum Unfall (Time to Accident, TA). Einen guten Überblick über SSM geben die Veröffentlichungen von Minderhoud et al., Gettman et al. und Thom [Min01, Get03a, Get03b, Tho14].

Nach Steinhoff, Vogel, Ozbay et al. und Yang eignen sich für die hier untersuchten Streckenabschnitte, welche alle Teil von Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen sind, besonders die THW und die TTC zur Beschreibung der Verkehrssicherheit [Ste03b, Vog03, Ozb08, Yan12]. Die THW eines Fahrzeugpärchens beschreibt den zeitlichen Abstand der beiden Fahrzeuge zueinander. Sie entspricht der Zeit, die vergeht, bis die Front des hinteren Fahrzeugs den Ort erreicht, an dem sich zu Beginn der Zeitmessung das Heck des vorderen Fahrzeugs befand. Die THW hängt somit zum einen vom räumlichen Abstand der beiden Fahrzeuge und zum anderen von der Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs ab. Die TTC basiert auf der THW. Sie beschreibt, an welchem Zeitpunkt in der Zukunft es zur Kollision der beiden Fahrzeuge kommen wird. Dabei wird angenommen, dass sich beide Fahrzeuge zukünftig gleichförmig weiter bewegen werden.

Der TTC wird in [Vog03] eine etwas höhere Aussagekraft bezüglich der Verkehrssicherheit zugesprochen als der THW. Es muss dabei aber beachtet werden, dass die TTC die Kritikalität einer Verkehrssituation eher unterschätzt und bei der THW eher eine Überschätzung der Kritikalität stattfindet [Tho14]. Die Unterschätzung der Kritikalität durch die TTC findet bevorzugt bei hohen Geschwindigkeiten und kleinen Geschwindigkeitsdifferenzen statt. Aus diesem Grund wird in [Tho14] von der alleinigen Verwendung der TTC als Indikator der Kritikalität in Autobahnszenarien abgeraten. In der vorliegenden Arbeit wurde dies berücksichtigt.

Die im Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen erfordern die Beschreibung der Verzögerungsmanöver, die die Fahrzeugführer im Überwachungsfall durchführen. Mit Hilfe der THW und der TTC gelingt diese Beschreibung nicht ausreichend. Es wird weiter unten im Text deshalb ein weiterer Vertreter für SSM konstruiert. Dieser wird als maximale Bremsverzögerung (MBV) bezeichnet.

Wie bereits im Abschnitt 3.1.1 beschrieben, können mit Hilfe der Trackingradarsensoren Einzelfahrzeugdaten und somit die mikroskopischen Parameter des Verkehrsflusses gemessen werden. Die vom Trackingradar für jedes Fahrzeug bestimmten Positions-, Zeit- und Geschwindigkeitsdaten dienen als Eingangswerte für die TTC, THW und MBV eines jeden Fahrzeugs.

Die THW wurde in dieser Arbeit immer für einen festen Messort bestimmt. Um den Einfluss von Verdeckungsszenarien ausschließen zu können, lag dieser Messort meist in einer Entfernung von ca. 30 m bis 40 m zu den Trackingradarsensoren. Die THW ergibt sich für ein Fahrzeugpärchen aus folgender Formel:

$$\text{THW}_{i+1} = t_{i+1} - t_i \quad . \quad (3.1)$$

Die Parameter  $t_i$  und  $t_{i+1}$  bezeichnen hier die Zeitpunkte, an denen das vordere bzw. das hintere Fahrzeug den Messort passieren. Bei den so bestimmten THWs handelt es sich um die Bruttozeitlücken  $t_{\text{brutto}}$  zwischen den Fahrzeugen. Die Bruttozeitlücke beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen den Fahrzeugfronten bzw. Fahrzeughecks zweier Fahrzeuge. Auf den untersuchten Autobahnen wurden die Bruttozeitlücken fahrspurselektiv mit Hilfe einer mittleren Fahrzeuglänge und der jeweiligen Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs korrigiert, um die Verkehrssicherheit besser betrachten zu können. Die mittlere Fahrzeuglänge wurde dabei mit Hilfe des fahrspurspezifischen Anteils des Schwerlastverkehrs und Literaturwerten für die mittleren Fahrzeuglängen von PKWs und LKWs bestimmt. Für die Bruttozeitlücken konnte der maximale Messfehler mit 0,2 s abgeschätzt werden.

Die TTC wurde hier ebenfalls immer für einen festen Messort in einer Entfernung von ca. 30 m bis 40 m zu den Trackingradarsensoren bestimmt. Für zwei aufeinander folgende Fahrzeuge gilt:

$$\text{TTC}_{i+1} = v_i \frac{t_{i+1} - t_i}{v_{i+1} - v_i} \quad . \quad (3.2)$$

Hier bezeichnet  $v_i$  die Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs am Messort und  $t_i$  den Zeitpunkt, an dem das vordere Fahrzeug den Messort passiert. Die Parameter  $v_{i+1}$  und  $t_{i+1}$  gelten analog für das hintere Fahrzeug. Unter der Annahme, dass sich die Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs im Zeitraum  $t_{i+1} - t_i$  nicht geändert hat, entspricht  $\text{TTC}_{i+1}$  der Zeit bis zur Kollision beider Fahrzeuge (TTC), falls beide ihre Geschwindigkeiten beibehalten. Anhand von Gleichung (3.2) wird ersichtlich, dass die TTC nur definiert ist, wenn das hintere Fahrzeug eine höhere Geschwindigkeit besitzt als das vordere Fahrzeug. Für die TTCs, die mit Hilfe der Messdaten des Trackingradars bestimmt werden, konnte der maximale Fehler mit 0,6 s abgeschätzt werden. Eine Korrektur der TTCs mit Hilfe der mittleren Fahrzeuglänge wurde hier nicht durchgeführt, weil dies vor dem Hintergrund der einfließenden Unsicherheiten und der bereits enthaltenen Annahmen nicht zu einer nennenswert präziseren Betrachtung der Verkehrssicherheit geführt hätte.

Für die Bestimmung der MBV wurden die Geschwindigkeits- und Ortsänderungen eines jeden Fahrzeugs über den gesamten von den Trackingradarsensoren erfassten Bereich hinweg analysiert und mit Hilfe dieser Daten Beschleunigungswerte berechnet. Die Berechnung der Beschleunigungswerte ergab sich wie folgt aus den erfassten Geschwindigkeits- und Ortsänderungen:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot \Delta s} \quad . \quad (3.3)$$

Hier bezeichnet  $v_1$  die Geschwindigkeit des Fahrzeugs am Beginn einer Teilstrecke und  $v_2$  die Geschwindigkeit des Fahrzeugs am Ende der jeweiligen Teilstrecke. Die exakte Teilstreckenlänge wird mit  $\Delta s$  bezeichnet. Die Teilstreckenlänge wurde mit ca. 30 m so gewählt, dass der maximale Fehler für die Bestimmung der mittleren Beschleunigung mit  $\pm 1,5 \text{ m/s}^2$  abgeschätzt werden konnte.

Der Erfassungsbereich wurde für die Bestimmung der MBV in mehrere 30 m lange Teilstrecken zerlegt, wobei sich benachbarte Teilstrecken um jeweils 20 m überlappten. Für ein Fahrzeug, welches über 100 m hinweg verfolgt wurde, ergaben sich somit 8 Teilstrecken (Strecke 1: 110 m bis 80 m, Strecke 2: 100 m bis 70 m, ..., Strecke 8: 40 m bis 10 m). Das heißt, für ein solches Fahrzeug konnten 8 Beschleunigungswerte bestimmt werden. Der betragsmäßig größte der negativen Beschleunigungswerte wurde als MBV dem jeweiligen Fahrzeug zugeordnet. Wenn die Beschleunigungswerte eines Fahrzeugs im gesamten Erfassungsbereich positiv waren, so konnte diesem Fahrzeug keine MBV zugeordnet werden.

### 3.4. Zusammenfassung der Untersuchungsmethoden

In den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels wurden die Untersuchungsmethoden vorgestellt, mit deren Hilfe die Forschungsfragen dieser Arbeit bearbeitet wurden.

Die Untersuchung des Verkehrsflusses und der Fahrmanöver im Überwachungsfall erfolgte mit Hilfe von verdeckten Verkehrsflussmessungen. Dabei wurden Trackingradarsensoren und die vorhandenen Sensoren der WVA verwendet. Mit Hilfe der Trackingradarsensoren war es möglich die Positions-, Zeit- und Geschwindigkeitsinformationen für alle Fahrzeuge im Erfassungsbereich mit einer Wiederholrate von 10 Hz zu bestimmen. Diese mikroskopischen Parameter des Verkehrsflusses wurden zur Beschreibung der Fahrmanöver und zur Berechnung der makroskopischen Parameter mittlere lokale Geschwindigkeit  $\bar{v}_l$ , Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilung  $\sigma_v$  und Verkehrsstärke  $Q$  verwendet. Die Sensoren der WVA boten keine Einzelfahrzeugdaten, eigneten sich dafür aber zur Beschreibung des Verkehrsflusses des gesamten Streckenabschnitts.

Neben den Verkehrsflussmessungen wurde eine Umfrage unter den Autofahrern durchgeführt – bezüglich deren Geschwindigkeitsbewusstsein und deren Verhalten im Überwachungsfall. Die Umfrage bestand aus 19 Fragen und war über die Internetseiten der PTB für etwa zwei Jahre erreichbar. Der Link zur Umfrage wurde breit gestreut, damit möglichst viele Teilnehmer die Umfrage durchführen und alle Altersgruppen im Teilnehmerfeld vertreten sind. Der Vergleich zwischen den Umfrageergebnissen und den Ergebnissen der Verkehrsflussmessungen ermöglicht einen weiteren Einblick in das Fahrverhalten im Überwachungsfall.

Die Betrachtung der Verkehrssicherheit erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mittels SSM. Das heißt, für die Betrachtung der Verkehrssicherheit wurden keine Unfallzahlen heran-

gezogen, weil diese stark von jahreszeitlichen Schwankungen und zufälligen Ereignissen beeinflusst werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Vertreter der SSM sind die THW, die TTC und die MBV. Die MBV wurde eigens für diese Arbeit konstruiert, weil mit diesem Parameter die Verzögerungsmanöver im Überwachungsfall und deren Kritikalität besonders gut beschrieben werden können. Als Eingangswerte für die aufgeführten SSM dienten die mikroskopischen Parameter des Verkehrsflusses, die mit Hilfe der Trackingradarsensoren gemessen werden konnten.

Weiterhin wurden in diesem Kapitel die untersuchten Streckenabschnitte vorgestellt. Die Verkehrsflussmessungen wurden demnach auf der A1 bei Bremen, auf der A2 bei Braunschweig, auf der A3 bei Köln, auf der A71 bei Suhl und auf der B6 bei Hannover durchgeführt.



## 4. Auswertung der Umfrage

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der Umfrage präsentiert und diskutiert. Weitere Umfrageergebnisse sind im Anhang B zu finden. Der Anhang D enthält zusätzlich alle Fragen und Antwortmöglichkeiten der Umfrage.

Die Umfrage untergliedert sich in sechs Fragenkomplexe. Jede Frage ist einem dieser Fragenkomplexe zugeordnet. Die Fragenkomplexe lauten:

- |                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1. Persönliches                | 4. Reaktion im Überwachungsfall |
| 2. Geschwindigkeitsbewusstsein | 5. Meinung                      |
| 3. Geschwindigkeitswahl        | 6. Kenntnis                     |

Es wurde hier ein ähnliches Fragebogenkonzept gewählt wie in [Lip12]. Das heißt, die Reihenfolge der Fragen in der Umfrage richtete sich nicht strikt nach der Abfolge der Fragenkomplexe, sondern war auf eine gute Verständlichkeit für die Teilnehmer ausgelegt.

Im Folgenden werden die ersten vier Fragenkomplexe (Persönliches, Geschwindigkeitsbewusstsein, Geschwindigkeitswahl und Reaktion im Überwachungsfall) ausgewertet und die Ergebnisse dargestellt. Mit Hilfe der Ergebnisse dieser Fragenkomplexe wird die Forschungsfrage 1 dieser Arbeit diskutiert werden, die allgemein die Fahrmanöver in Geschwindigkeitsüberwachungssituationen thematisiert. Die Antworthäufigkeiten in diesen Fragenkomplexen werden außerdem Informationen dazu liefern, welche Beweggründe bei den Fahrzeugführern zu den entsprechenden Fahrmanövern im Überwachungsfall führen. Die Umfrage thematisiert ausschließlich punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung – teilweise in Kombination mit WVA. Die Diskussion der Umfrageergebnisse wird daher keine Aussagen zur Abschnittskontrolle enthalten.

Die Auswertung des fünften und sechsten Fragenkomplexes (Meinung und Kenntnis) erfolgt in den Anhängen B.1 und B.2, weil die in diesen beiden Fragenkomplexen enthaltenen Aspekte nicht im Fokus dieser Arbeit standen. Die Anhänge B.3 bis B.5 enthalten außerdem Erkenntnisse zum Einfluss der Routine, des Geschlechts und des Alters der Teilnehmer auf die Umfrageergebnisse. Diese Erkenntnisse standen ebenfalls nicht im Fokus dieser Arbeit.

Insgesamt beteiligten sich 1632 Teilnehmer an der Umfrage. Dabei ist zu beachten, dass die Frage 7 erst im November 2013 in den Fragenkatalog aufgenommen wurde, so dass

für diese Frage der Stichprobenumfang 216 Teilnehmer beträgt. Vor dem Beginn der Auswertung der Umfrage wurden unplausible Antworten aus den erhobenen Daten entfernt. Der Anteil unplausibler Antworten betrug etwa 0,5 % an der Gesamtheit aller Antworten.

Für die Bewertung der Ergebnisse wurden  $\chi^2$ -Anpassungstests und  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstests durchgeführt (siehe Anhang C). Da jeder Teilnehmer ein eigenes Verständnis von den zur Verfügung gestellten Antwortmöglichkeiten besitzt, wurden für diese statistischen Tests oftmals die Häufigkeiten der Antworten „immer“ und „meist“ bzw. „selten“ und „nie“ zusammengefasst. Gleiches gilt für die Antwortmöglichkeiten „voll und ganz“ und „überwiegend“ bzw. „kaum“ und „gar nicht“.

### 4.1. Fragenkomplex: Persönliches

Zum ersten Fragenkomplex zählten die Fragen 16 bis 19. In diesem Fragenkomplex wurden persönliche Angaben der Teilnehmer erfasst.

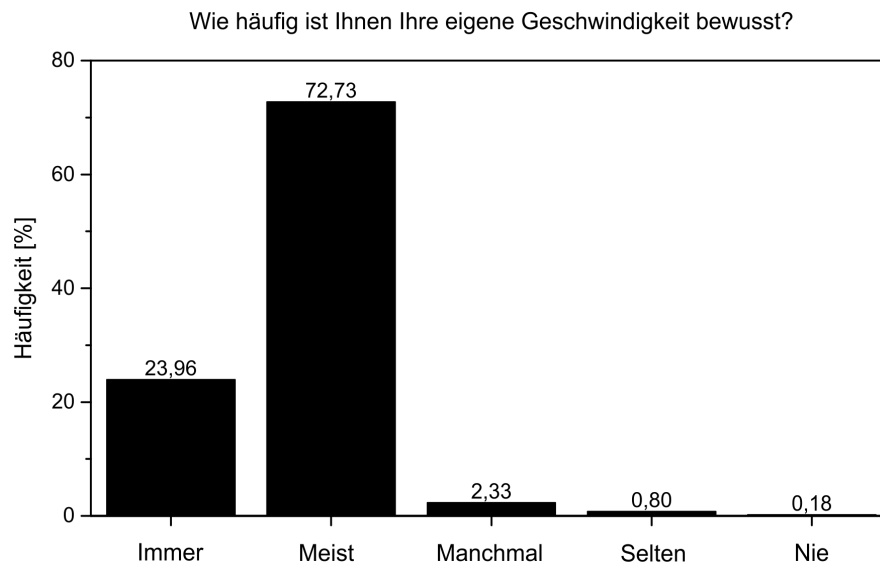
Das mittlere Alter der Teilnehmer betrug 38 Jahre. Der jüngste Teilnehmer war 17 Jahre alt und der älteste 85 Jahre. Im Mittel besaßen die Teilnehmer seit 20 Jahren einen Führerschein. Es nahmen insgesamt 354 Frauen und 1278 Männer teil.

Um zu identifizieren, welche Teilnehmer sich in der Vergangenheit häufiger in einer Überwachungssituation auf Autobahnen mit WVA befanden, wurde in der letzten Frage die Zustimmung zu folgender Aussage abgefragt: „Ich begegne jede Woche stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten auf Autobahnabschnitten mit WVZ-Schilderbrücken!“ 1170 Teilnehmer stimmten dieser Aussage „teilweise“ bzw. „kaum“ oder „gar nicht“ zu. Diese Teilnehmer wurden zur Gruppe der Nicht-Kenner subsumiert. Die anderen 462 Teilnehmer stimmten dieser Aussage „überwiegend“ bzw. „voll und ganz“ zu. Diese wurden im Rahmen der Auswertung als Kenner bezeichnet. Die Unterscheidung zwischen Kennern und Nicht-Kennern war für die Untersuchung des Einflusses der Routine auf die Umfrageergebnisse entscheidend (Anhang B.3).

### 4.2. Fragenkomplex: Geschwindigkeitsbewusstsein

Der zweite Fragenkomplex behandelte das Geschwindigkeitsbewusstsein und bestand aus den Fragen 1, 4 und 5.

Die Frage 1 betrachtete das Bewusstsein der Teilnehmer bezüglich ihrer eigenen Geschwindigkeit. In Frage 1 gaben 96,69 % der Teilnehmer an, dass sie sich „immer“ oder „meist“ ihrer eigenen Geschwindigkeit bewusst sind. Nur 3,31 % der Teilnehmer antworteten mit „manchmal“, „selten“ oder „nie“. In Abbildung 4.1 wird die zugehörige Häufigkeitsverteilung der Antworten dargestellt. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass unter den Fahrzeugführern das Bewusstsein über die eigene Geschwindigkeit vermutlich stark ausgeprägt ist.

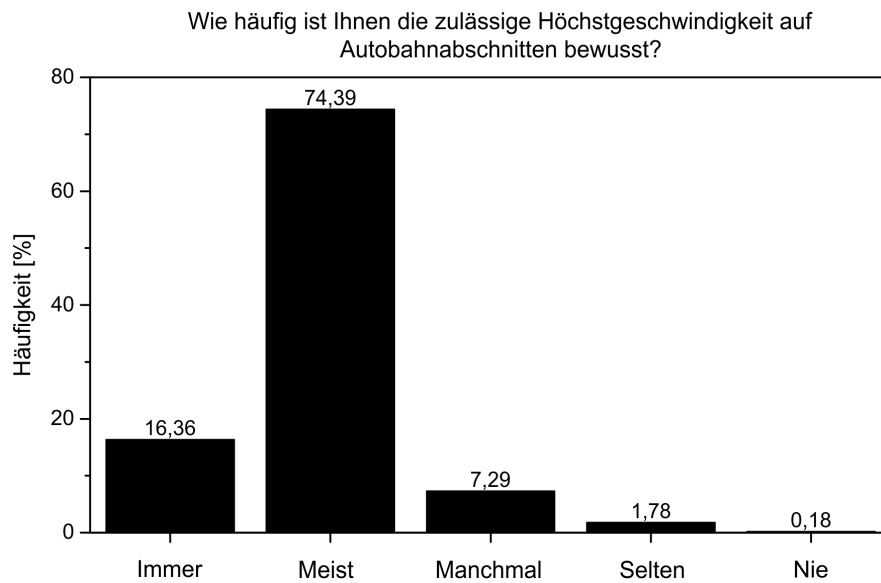


**Abbildung 4.1.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 1.

In der Frage 4 wurden die Teilnehmer nach der Häufigkeit gefragt, mit der sie sich der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf Autobahnabschnitten bewusst sind. 90,75 % der Teilnehmer antworteten auf diese Frage mit „immer“ oder „meist“. Nur 9,25 % der Teilnehmer entschieden sich hier für die Antworten „manchmal“, „selten“ oder „nie“ (Abbildung 4.2).

Die Frage 5 betrachtete, wie die Frage 4, das Bewusstsein der Teilnehmer über die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Im Unterschied zur Frage 4 standen bei Frage 5 aber Autobahnabschnitte mit WVA im Vordergrund. Die Ergebnisse zu Frage 5 werden in Abbildung 4.3 dargestellt. Dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass einem Anteil von 89,89 % der Teilnehmer die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnabschnitten mit WVA nach eigener Aussage „immer“ oder „meist“ bewusst ist. Nur 10,11 % entschieden sich bei Frage 5 für die Antworten „manchmal“, „selten“ oder „nie“.

Die Ergebnisse der Fragen 4 und 5 deuten auf ein großes Bewusstsein der Fahrzeugführer bezüglich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen allgemein und auf Autobahnabschnitten mit WVA hin. Der Vergleich beider Ergebnisse zeigt, dass laut Umfrage auf Autobahnabschnitten mit WVA das Bewusstsein der Teilnehmer über die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit signifikant stärker ausgeprägt ist als für Autobahnen allgemein (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %). Während bei Frage 4 ein Anteil von 16,36 % der Teilnehmer angab, sich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit „immer“ bewusst zu sein, waren es bei Frage 5 entsprechend 29,72 %. Die Ursache hierfür könnte eventuell in der Beschilderungsdichte zu finden sein. Vielleicht wird auf Autobahnabschnitten mit WVA die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit häufiger angezeigt als



**Abbildung 4.2.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 4.

auf Autobahnabschnitten mit fester Beschilderung. Nach den von Riegelhuth et al. zitierten Verwaltungsvorschriften und Richtlinien dürfte dies aber nicht der Fall sein [Rie15]. Eventuell begründet sich dieses Ergebnis aber auch in den besseren Sichtverhältnissen für WVZ. Während eine feste Beschilderung meist am Straßenrand angebracht wird und nicht aktiv leuchtet, sind WVZ über der Fahrbahn angebracht und leuchten aktiv. Das höhere Bewusstsein über die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnabschnitten mit WVA ist bemerkenswert, da die Verteilung der Antworthäufigkeiten für Frage 15 zeigt, dass teilweise Unsicherheit bzw. Unwissenheit unter den Teilnehmern über die Aufhebung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnabschnitten mit WVA besteht (Anhang B.2).

In der Literatur finden sich viele Untersuchungen, die die hier gefundenen Ergebnisse stützen. Ryeng konnte mit Hilfe einer Umfrage und gleichzeitigen Geschwindigkeitsmessungen zeigen, dass der Großteil der Fahrzeugführer seine eigene Geschwindigkeit sehr gut einschätzt, wobei eine kleine systematische Unterschätzung festzustellen war [Rye12]. Åberg et al., Quimby et al. und Hagelund et al. fanden zudem eine gute Korrelation zwischen den gemessenen Geschwindigkeiten und den Geschwindigkeiten, die die Fahrer angaben, gefahren zu sein [Abe97, Qui99a, Qui99b, Hag00]. Nur Fahrer, die als Raser eingestuft wurden, neigten dort zu einer Unterschätzung der eigenen Geschwindigkeit. In einer ähnlich angelegten Studie von Fildes et al. konnte hingegen festgestellt werden, dass den Übertretern die zulässige Höchstgeschwindigkeit zwar bewusst ist, sie aber ihre eigene Geschwindigkeit falsch einschätzten und deshalb Übertretungen begangen [Fil94].

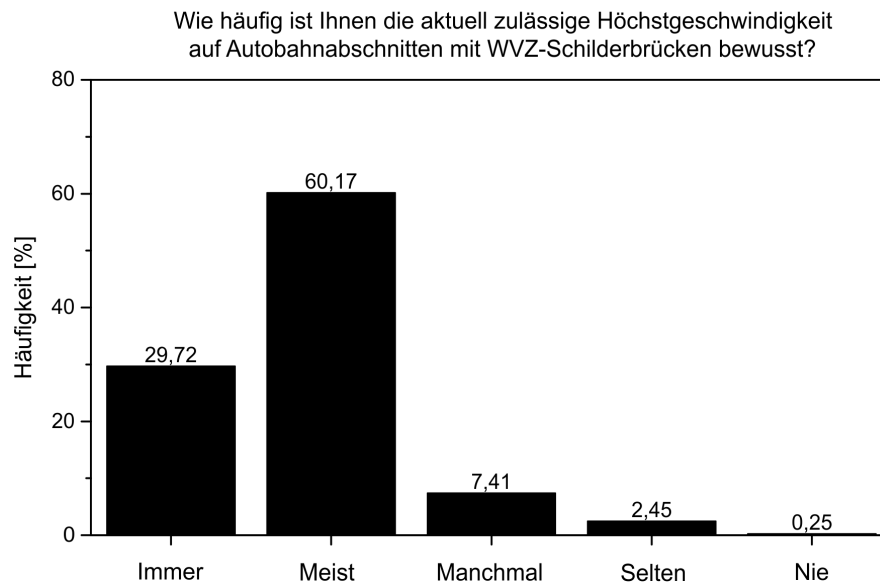


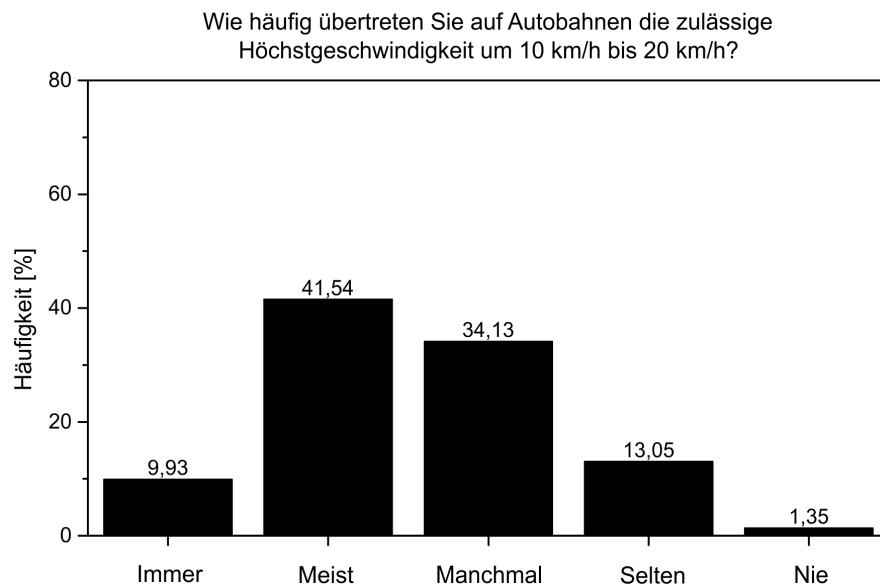
Abbildung 4.3.: Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 5.

Es existieren weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen, die das Geschwindigkeitsbewusstsein der Autofahrer diskutieren. Die Artikel von de Leonardis et al. und Stigson et al. konnten zum Beispiel zeigen, dass ein im Fahrzeug verbautes System, welches vor Geschwindigkeitsübertretungen warnt, die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeugführer senkt und den Befolgungsgrad erhöht [Leo14, Sti14]. Dieses System erhöhte das Geschwindigkeitsbewusstsein und konnte so diese Wirkung erzielen. Bei Stigson et al. wurde dies mittels finanzieller Anreize zusätzlich unterstützt. Im Artikel von de Leonardis et al. konnte aber auch gezeigt werden, dass ein solches System teilweise die Fahrer dazu anregte die eigene Geschwindigkeit bis zum Grenzwert, bei dem eine Warnung ertönt, zu erhöhen.

### 4.3. Fragenkomplex: Geschwindigkeitswahl

Im Fokus des dritten Fragenkomplexes stand die Geschwindigkeitswahl der Autofahrer. Der dritte Fragenkomplex umfasste die Fragen 2 und 3. Beide Fragen gliederten sich in jeweils zwei Teilfragen. Die Befragten mussten in jeder Teilfrage die Häufigkeit ihrer begangenen Geschwindigkeitsübertretungen angeben. Die Teilfragen unterschieden sich zum einen im Betrag der Übertretung und zum anderen in der Art der Beschilderung.

Die Mehrheit der Befragten (51,47 %) gab im Teil 1 von Frage 2 an, die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen „immer“ oder „meist“ um 10 km/h bis 20 km/h zu übertreten (Abbildung 4.4). Die übrigen 48,53 % begehen laut Umfrage auf Autobahnen eine Übertretung in dem genannten Maße nur „manchmal“, „selten“ oder „nie“.



**Abbildung 4.4.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 1 von Frage 2.

Da nach eigenen Angaben sich fast alle Teilnehmer über ihre eigene Geschwindigkeit (Frage 1) und über die zulässige Höchstgeschwindigkeit (Frage 4) bewusst sind, kann hier geschlossen werden, dass etwa die Hälfte der Teilnehmer auf Autobahnen bewusste Übertreter sind.

Im Teil 1 von Frage 3 äußerten 37,50 % der Teilnehmer, dass sie auf Autobahnabschnitten mit WVA die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit um 10 km/h bis 20 km/h „immer“ oder „meist“ übertreten. 62,50 % der Teilnehmer hingegen übertreten laut Umfrage auf diesen Streckenabschnitten nur „manchmal“, „selten“ oder „nie“ um 10 km/h bis 20 km/h (Abbildung 4.5).

Auf Grund der Ergebnisse der Fragen 2 und 3 – jeweils Teil 1 – ist davon auszugehen, dass unabhängig von der Beschilderung bewusste Übertretungen um 10 km/h bis 20 km/h auf Autobahnen relativ häufig vorkommen. Wobei dies auf Autobahnabschnitten allgemein signifikant häufiger passiert als auf Autobahnabschnitten mit WVA (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %). Dies deutet auf eine höhere Akzeptanz der Umfrageteilnehmer für zulässige Höchstgeschwindigkeiten hin, die mittels WVZ dargestellt werden – wie es auch in [Rie15] gezeigt werden konnte. Es könnte sich hier aber auch teilweise um eine Folge der Anpassung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit an die aktuelle Verkehrs- und Witterungssituation auf Streckenabschnitten mit WVA handeln. In der Literatur finden sich sowohl Fälle, in denen die Schaltprogramme der WVA sehr gut von den Autofahrern akzeptiert werden, als auch Fälle, in denen von einer schlechten Akzeptanz gesprochen werden muss [Alb76, Kay82, Bal95, Bal98, Sor14, Tor14, Sor15a, Rig16b, Rig16a].

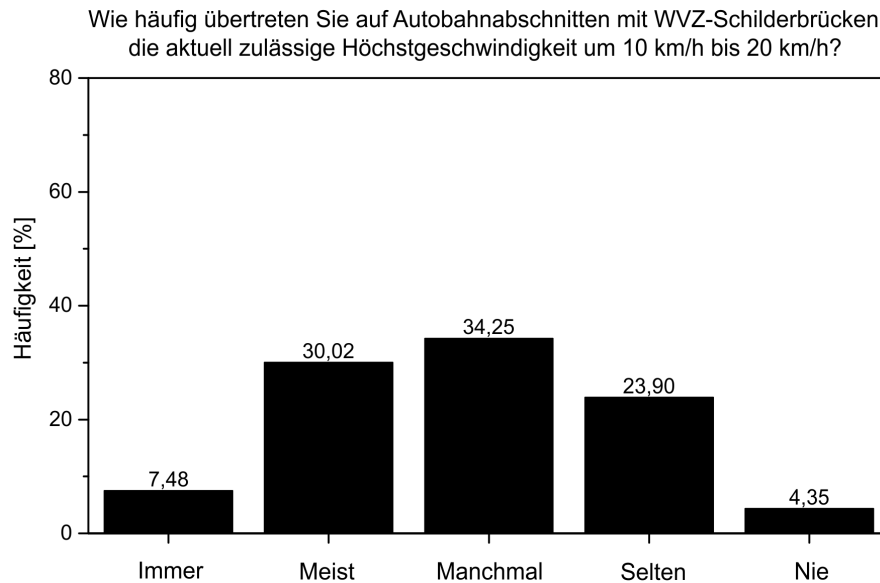
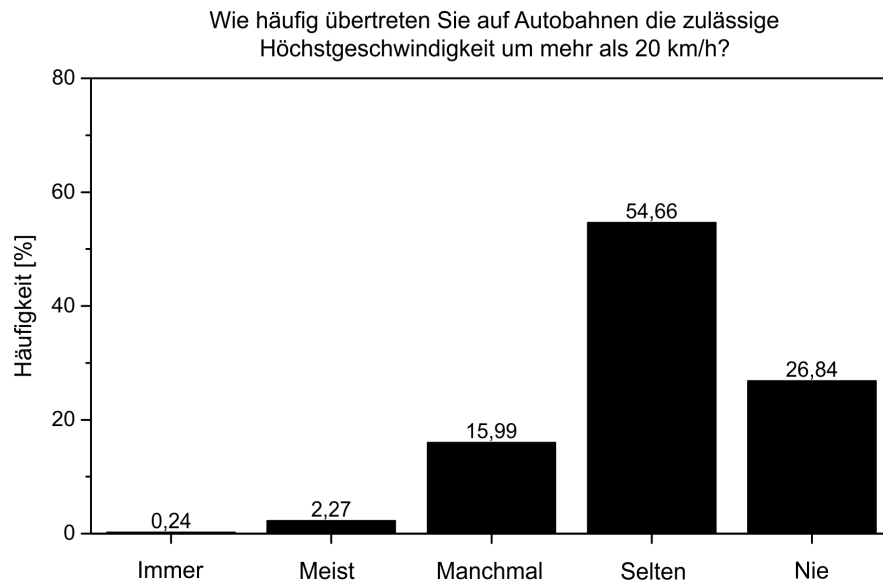


Abbildung 4.5.: Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 1 von Frage 3.

Im Teil 2 der Frage 2 wurden die Teilnehmer nach der Häufigkeit ihrer Übertretungen von mehr als 20 km/h auf Autobahnen befragt. Der Abbildung 4.6 ist zu entnehmen, dass nur 2,51 % der Teilnehmer nach eigener Aussage „immer“ oder „meist“ eine solche Übertretung begehen. 15,99 % der Teilnehmer wählten die Antwortmöglichkeit „manchmal“ und die große Mehrheit (81,50 %) entschied sich für „selten“ oder „nie“. Für den Teil 2 von Frage 3 ergaben sich ähnliche Zahlen, wobei dort die Antwort „nie“ im Vergleich zur Frage 2 signifikant häufiger gewählt wurde (Abbildung 4.7).

Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse ist festzuhalten, dass mit zunehmendem Betrag der Übertretung der Anteil der Übertreter erwartungsgemäß abnimmt. Unabhängig von der Art der Beschilderung begeht laut Umfrage nur eine Minderheit Übertretungen von mehr als 20 km/h. Dieses Verhalten ist angepasst an die im Bußgeldkatalog festgelegten Strafen für Geschwindigkeitsübertretungen. Ab Übertretungen von 21 km/h drohen den Verkehrsteilnehmern Punkte im zentralen Verkehrsregister, die in der Summe zu einem Entzug der Fahrerlaubnis führen können.

Die Ergebnisse dieses Fragenkomplexes stehen teilweise in guter Übereinstimmung mit den von Åberg et al., Hagelund et al. und Schechtman et al. auf dänischen, schwedischen und israelischen Straßen gefundenen Übertretungsgraden von 25 % bis 50 % [Abe97, Hag00, Sch16]. Außerdem korrespondieren die Ergebnisse dieses Fragenkomplexes mit den Ergebnissen in [Cau04]. Dort äußerten 20 % der Teilnehmer, dass sie auf Autobahnen in Deutschland die zulässige Höchstgeschwindigkeit „immer“ bzw. „sehr oft“ übertreten. Ähnliche Ergebnisse konnten bei Untersuchungen von Letirand et al.



**Abbildung 4.6.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 2 von Frage 2.

in Frankreich erzielt werden. Im Rahmen einer Umfrage wurde dort festgestellt, dass die im Mittel zugegebene Übertretung der Autofahrer 17,6 km/h beträgt [Let05]. In der internationalen Literatur finden sich weitere für diesen Fragenkomplex interessante Ergebnisse. So gaben in einer Umfrage in Israel 34 % der Teilnehmer an, die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu überschreiten. Nach der Einführung von mehreren Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten äußerten sich nur noch 21 % als Geschwindigkeitsübertreter [Mus14].

In der Literatur lässt sich weiterhin finden, dass Autofahrer, die häufig übertreten, auch häufiger andere Übertreter wahrnehmen als Autofahrer, die nicht so häufig übertreten [Abe97, Hag00]. Der Artikel von Ahie et al. zeigt zudem mit Hilfe einer Umfrage, dass im Mittel die Teilnehmer 2 bis 3 km/h schneller fahren als die von ihnen als sicher eingestufte Geschwindigkeit [Ahi15]. Es konnte dort außerdem gezeigt werden, dass der Anlass einer Fahrt sehr großen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl hat.

Einen weiteren wichtigen Faktor bei der Geschwindigkeitswahl stellt die Geschwindigkeit benachbarter Autofahrer dar. Oftmals wird von einem Geschwindigkeitsdruck berichtet, der von den anderen Autofahrern ausgeübt wird [Abe97, Hag00, Cau04, Fle10, Art11, Rye12].

Die Übertretungshäufigkeit und das Maß der Übertretung hängen entsprechend der Veröffentlichungen von Feng, Schüller, Anastasopoulos et al., Gargoum et al., Schechtman et al. und Lee et al. stark vom länderspezifischen Überwachungsdruck, den drohenden



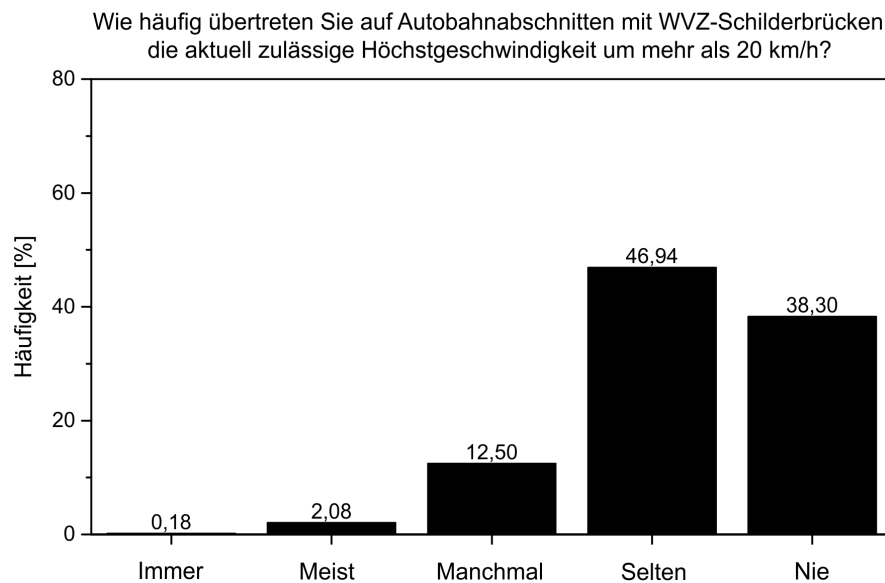


Abbildung 4.7.: Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 2 von Frage 3.

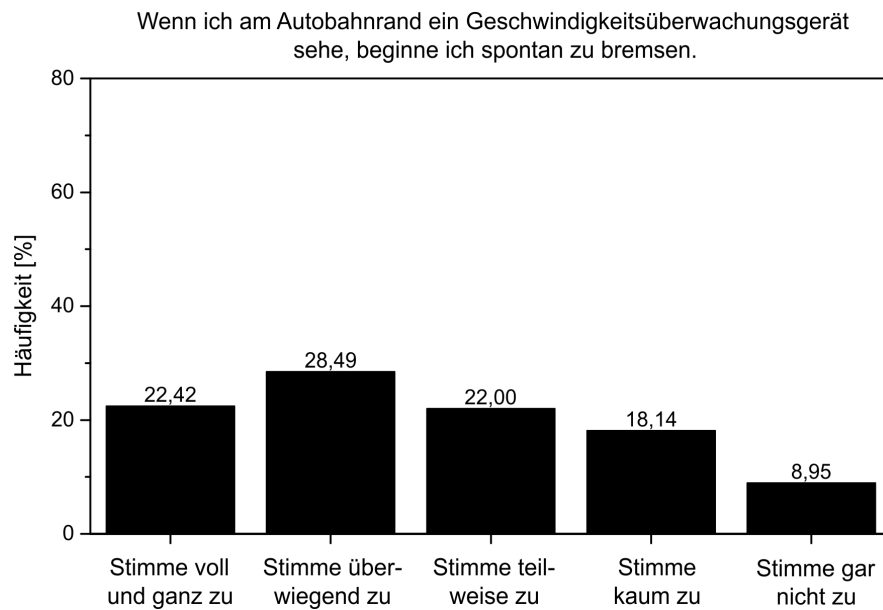
Konsequenzen, der Beschaffenheit des Verkehrsraums, den geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen, dem Fahrer, dem Fahrtanlass, den benachbarten Autofahrern und weiteren Faktoren ab [Fen01, Sch10a, Ana16, Gar16, Sch16, Lee17]. Vor dem Hintergrund der bereits in der Literatur vorhandenen Erkenntnisse, scheinen die Ergebnisse der Fragen 2 und 3 plausibel.

#### 4.4. Fragenkomplex: Reaktion im Überwachungsfall

Die Reaktion der Teilnehmer im Überwachungsfall und ihre Wahrnehmung von Reaktionen anderer Autofahrer im Überwachungsfall waren Teil des vierten Fragenkomplexes. Dieser Fragenkomplex umfasste die Fragen 6 bis 10.

In der Frage 6 mussten die Teilnehmer ihre Zustimmung zu folgender These zum Ausdruck bringen. „Wenn ich am Autobahnrand ein Geschwindigkeitsüberwachungsgerät sehe, beginne ich spontan zu bremsen“. Etwa die Hälfte der Teilnehmer (50,91 %) stimmte dieser These, „voll und ganz“ oder „überwiegend“ zu. 22,00 % der Teilnehmer stimmten dieser These „teilweise“ zu und 27,09 % lehnten diese These eher ab (Abbildung 4.8). Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit dem Ergebnis von Teil 1 in Frage 2, wonach die Hälfte der Autofahrer bewusste Übertreter sind. Diese Übertreter möchten einer Ahndung entgehen und bremsen daher spontan ab.

Frage 8 betrachtete, ähnlich zu Frage 6, das Verzögerungsverhalten im Überwachungsfall. Der Unterschied bestand darin, dass bei Frage 6 das eigene Verhalten und bei Frage 8

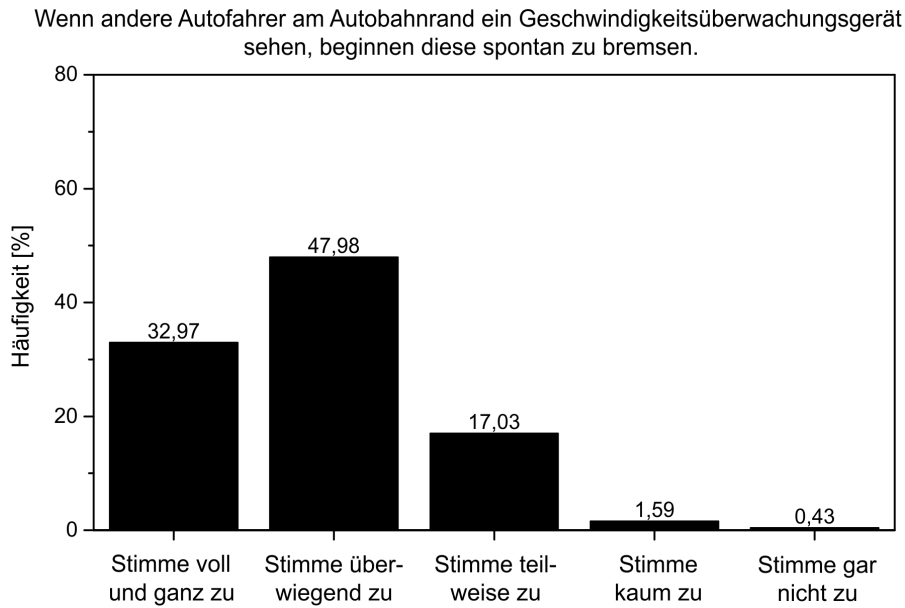


**Abbildung 4.8.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 6.

das Verhalten anderer betrachtet wurde. In Frage 8 stimmten 80,95 % der Befragten der Aussage, dass andere Autofahrer beim Anblick eines Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes spontan bremsen, „voll und ganz“ oder „überwiegend“ zu. Nur 19,05 % stimmten dieser Aussage „teilweise“, „kaum“ oder „gar nicht“ zu (Abbildung 4.9).

Vergleicht man die Häufigkeitsverteilungen der Fragen 6 und 8 miteinander, so stellt man fest, dass die Autofahrer ihre eigene Reaktion auf ein Geschwindigkeitsüberwachungsgerät anders wahrnehmen, als die Reaktion der anderen Autofahrer. Laut Umfrage werden viel häufiger die Bremsmanöver anderer Fahrer registriert als eigene Bremsmanöver. Dies steht in Analogie zu den Erkenntnissen in [Cau04, Ant12]. Dort wird berichtet, dass viele Autofahrer eher die Übertretungen der anderen Autofahrer wahrnehmen als eigene Übertretungen. Es ist dabei aber zu beachten, dass laut der Veröffentlichung von Åberg et al. Autofahrer dazu neigen, die Geschwindigkeiten der anderen Autofahrer zu überschätzen [Abe97].

Die Ergebnisse der Fragen 6 und 8 zeigen im Bezug auf die Forschungsfrage 1, dass die bevorzugte Reaktion im Überwachungsfall Bremsmanöver sind. Dies konnte im Rahmen von Befragungen in ähnlicher Weise bereits von Corbett, Ullman et al. und Hassan et al. gezeigt werden [Cor00, Ull14, Has17]. Die Häufigkeiten, mit denen diese Bremsmanöver auftreten, bewegen sich laut der Ergebnisse der Fragen 6 und 8 zwischen 50 % und 80 %. Da außerdem Frage 2 gezeigt hat, dass die typische Übertretung 10 km/h bis 20 km/h beträgt, kann daraus geschlussfolgert werden, dass in der Zufahrt eines Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes Bremsmanöver zu beobachten sind.

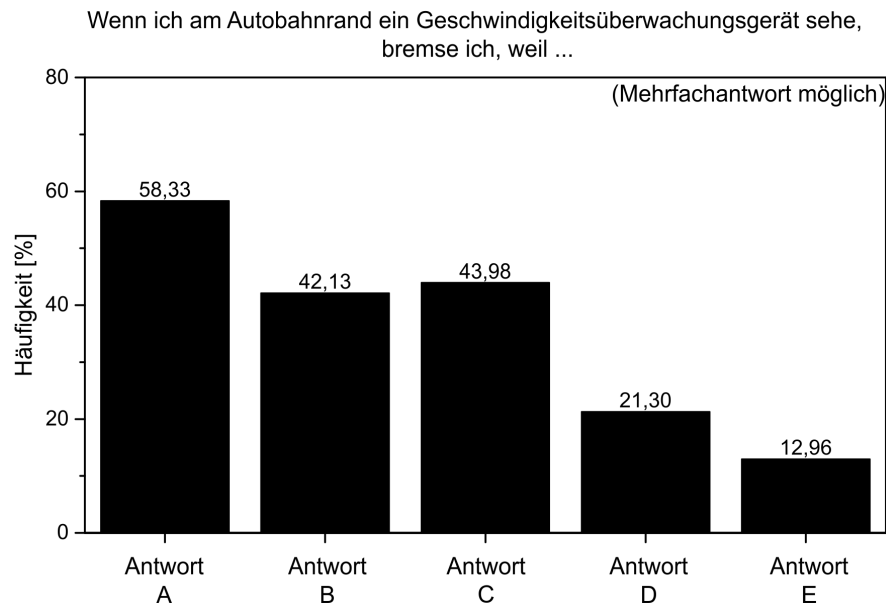


**Abbildung 4.9.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 8.

Laut Teil 1 von Frage 3 übertreten auf Autobahnabschnitten mit WVA 37,50 % der Befragten die zulässige Höchstgeschwindigkeit „immer“ oder „meist“ um 10 km/h bis 20 km/h. Vergleicht man diesen Prozentsatz mit den Häufigkeitsverteilungen der Fragen 6 und 8, so lässt sich keine gute Übereinstimmung finden. Auf Autobahnabschnitten mit WVA scheinen mehr Teilnehmer beim Anblick eines Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes spontan zu verzögern, als es bewusste Übertreter gibt. Ähnlich dazu konnte bereits in dem Artikel von Corbett mittels Umfragen gezeigt werden, dass selbst Fahrzeugführer, die sich nicht als Übertreter einstufen, im Überwachungsfall ihre Geschwindigkeit reduzierten [Cor00].

Für Teilnehmer, die sich im Teil 1 von Frage 3 nicht als Übertreter eingestuft haben, wurde anhand der Umfragedaten ermittelt, wie viele von diesen Teilnehmern beim Anblick eines Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes spontan bremsen. Insgesamt konnte die relative Häufigkeit dieser Teilnehmer mit 29,10 % bestimmt werden. Es ist daher zu vermuten, dass auf Autobahnabschnitten mit WVA beim Anblick eines Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes ca.  $\frac{1}{3}$  der Fahrzeugführer unnötigerweise ihre Geschwindigkeit reduzieren.

In Frage 7 wurden die Teilnehmer explizit nach den Gründen für die Verzögerungsmänoöver im Überwachungsfall gefragt. Es ist zu beachten, dass hier Mehrfachantworten möglich waren und nur ein Teil der Befragten an dieser Frage teilnahm. In Frage 7 gaben 58,33 % der Befragten an, dass sie bremsen, weil sie sich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit nicht ganz bewusst sind (Abbildung 4.10). Vor dem Hintergrund der Ergebnisse

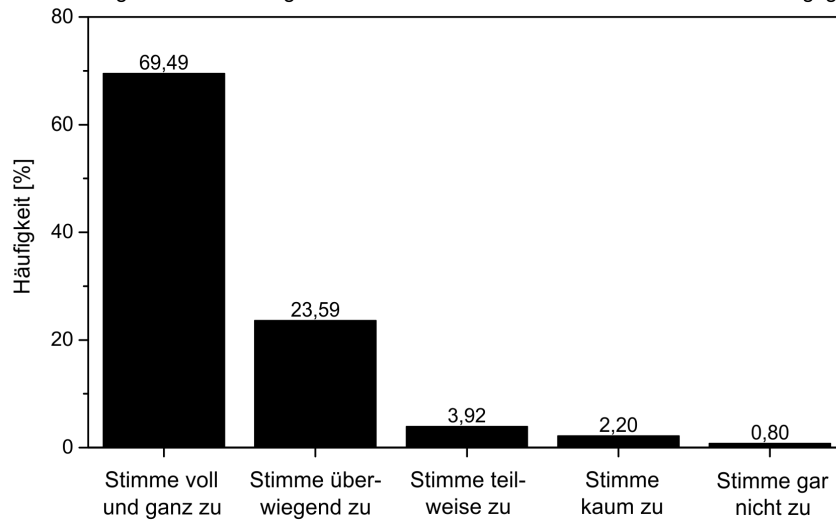


**Abbildung 4.10.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 7. Antwort **A**: mir die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht ganz bewusst ist. Antwort **B**: ich mir meiner aktuellen Übertretung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bewusst bin. Antwort **C**: ich sehe wie andere Autofahrer bremsen. Antwort **D**: ich der Überwachungstechnik nicht vertraue. Antwort **E**: Ich bremsen nicht!

der Fragen 4 und 5, die auf ein großes Bewusstsein über die zulässige Höchstgeschwindigkeit hinweisen, erscheint dieser große Prozentsatz hier überraschend. Offensichtlich beginnen die Befragten im Überwachungsfall an ihrem Geschwindigkeitsbewusstsein zu zweifeln. Einen großen Einfluss auf die Reaktion im Überwachungsfall scheinen auch die Verzögerungsmanöver benachbarter Autofahrer zu haben. In Frage 7 sagen 43,98 % der Teilnehmer, dass sie auf Grund der Bremsmanöver anderer Autofahrer ebenfalls zu bremsen beginnen. Weiterhin äußerten 42,13 % der Teilnehmer in Frage 7, dass sie bremsen, weil sie sich ihrer eigenen Übertretung bewusst sind. Dieser Prozentsatz passt gut zu den Fragen 2 und 3 (jeweils Teil 1). Dort hatten 51,47 % bzw. 37,50 % der Befragten zugegeben, die zulässige Höchstgeschwindigkeit „immer“ oder „meist“ um 10 km/h bis 20 km/h zu übertreten. Dass sie der Überwachungstechnik nicht vertrauen und deshalb bremsen, wird von 21,30 % der Befragten in Frage 7 vermerkt. Außerdem gaben 12,96 % der Teilnehmer an, nicht zu bremsen. Diese 12,96 % sind vergleichbar mit den 8,95 % der Befragten, die bei Frage 6 einem spontanen Bremsmanöver „gar nicht“ zustimmten.

Auf Grund der Häufigkeitsverteilung der Antworten in Frage 7 bleibt für die Forschungsfrage 1 festzuhalten, dass viele Teilnehmer im Überwachungsfall sich unsicher über die zulässige Höchstgeschwindigkeit sind und daher abbremsen. Dies wird auch durch die persönlichen Kommentare der Teilnehmer gestützt, die sie am Ende von Frage 7 abgeben konnten. Einige Teilnehmer beschrieben dort, dass im Überwachungsfall Zweifel

Wenn ich am Autobahnrand ein Hinweisschild sehe, das mit einer entsprechenden Entfernungsangabe auf ein stationäres Geschwindigkeitsüberwachungsgerät hinweist, dann prüfe ich meine eigene Geschwindigkeit und nähere mich aufmerksam dem Überwachungsgerät.



**Abbildung 4.11.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 9.

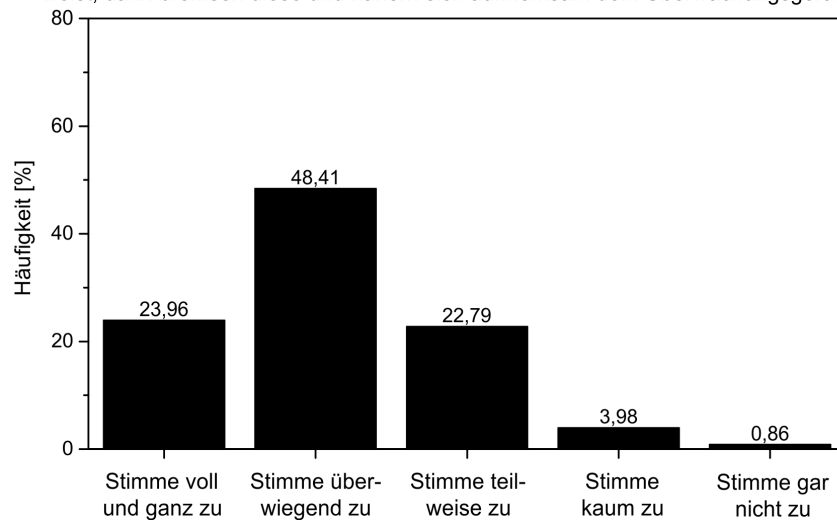
am Bewusstsein über die zulässige Höchstgeschwindigkeit entstehen. Es besteht hier kein Widerspruch in den Umfrageergebnissen. Eine Überwachungssituation stellt eine Besonderheit im Straßenverkehr dar in der die Fahrzeugführer auf Grund der drohenden Konsequenzen ihr zuvor geäußertes Geschwindigkeitsbewusstsein neu bewerten.

In [Lip12] konnte über eine Umfrage gezeigt werden, dass viele Fahrzeugführer im Überwachungsfall vorsichtshalber verzögern. Der Anteil dieser Fahrer lag dort zwischen 20 % und 40 %. In einer Umfrage von Blincoe et al. konnte ebenfalls von unnötigen Bremsmanövern berichtet werden [Bli06]. Bereits der Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von Frage 6 und 8 mit dem Teil 1 von Frage 3 hatte darauf hingedeutet, dass unnötige Bremsmanöver durchgeführt werden.

Vereinzelte Teilnehmer äußerten sich in Frage 7 kritisch zu den Bremsmanövern anderer Autofahrer. Es wird teilweise von unnötigen und gefährlich starken Bremsmanövern des Vordermannes berichtet. Diese Anmerkungen der Umfrageteilnehmer deuten darauf hin, dass die Geschwindigkeitsüberwachung auch kritische Verzögerungsmanöver zur Folge haben kann. Die Umfrage gibt hier somit bereits einen Hinweis auf die Antwort der Forschungsfrage 3, welche explizit nach kritischen Verzögerungsmanövern fragt.

Auf einigen Streckenabschnitten in Deutschland wird mittels Hinweisschildern den Autofahrern die Überwachungssituation bewusst angekündigt. Teilweise wird dabei mit konkreten Entfernungsangaben auf den Überwachungsort hingewiesen. Dies war zwischen Dezember 2011 und Februar 2013 zum Beispiel auf der A2 zwischen Helmstedt

Wenn andere Autofahrer am Autobahnrand ein Hinweisschild sehen, das mit einer entsprechenden Entfernungsangabe auf ein stationäres Geschwindigkeitsüberwachungsgerät hinweist, dann bremsen diese und nähern sich aufmerksam dem Überwachungsgerät.



**Abbildung 4.12.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 10.

und Hannover der Fall. In Frage 9 wurde das Verhalten der Teilnehmer an einem solchen Hinweisschild hinterfragt. Von den Teilnehmern stimmten in dieser Frage 93,08 % der Aussage, dass sie beim Anblick eines solchen Hinweisschildes ihre Geschwindigkeit kontrollieren und sich dem Überwachungsgerät aufmerksam nähern, „voll und ganz“ bzw. „überwiegend“ zu. Die anderen 6,92 % der Teilnehmer stimmten diesem Verhalten nur „teilweise“, „kaum“ oder „gar nicht“ zu (Abbildung 4.11).

In der letzten Frage dieses vierten Fragenkomplexes, Frage 10, wurden die Teilnehmer nach dem Verhalten anderer Autofahrer an einem solchen Hinweisschild befragt. In Frage 10 wurde die These geäußert, dass andere Autofahrer beim Anblick eines solchen Hinweisschildes abbremsen und sich anschließend dem Überwachungsgerät aufmerksam nähern. Von den Befragten stimmten 72,37 % dieser These „voll und ganz“ bzw. „überwiegend“ zu. Der Rest der Befragten, 27,63 %, stimmte dieser These nur „teilweise“, „kaum“ oder „gar nicht“ zu (Abbildung 4.12).

Die Fragen 9 und 10 deuten damit daraufhin, dass ein Hinweisschild die Aufmerksamkeit der Autofahrer bezüglich der eigenen Geschwindigkeit erhöht und somit die Häufigkeit von Geschwindigkeitsübertretungen reduziert. Dies konnte in der Literatur bereits umfangreich belegt werden [Roo90, Hol96, Cor99, Kee03, Ret08a, Lip12, Wil13, Has17]. Vermutlich ist diese erhöhte Aufmerksamkeit nachhaltiger, wenn keine konkrete Entfernungsangabe auf dem Hinweisschild angegeben wird.

## 4.5. Zusammenfassung der Umfrageergebnisse

Die in diesem Kapitel ausgewerteten Fragenkomplexe der Umfrage haben gezeigt, dass die Fahrzeugführer nach eigenen Angaben ein stark ausgeprägtes Bewusstsein bezüglich der eigenen Geschwindigkeit und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit besitzen. Laut Umfrage ist das Bewusstsein bezüglich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen mit WVA signifikant stärker ausgeprägt als auf Autobahnen allgemein. Die Ursache hierfür könnte eventuell in der besseren Sichtbarkeit der Anzeigen der WVA im Vergleich zu einer festen Beschilderung liegen. Dies konnte hier aber nicht genauer untersucht werden. Vor dem Hintergrund, dass gemäß den Antworthäufigkeiten von Frage 15 (Anhang B.2) unter den Teilnehmern Unsicherheiten bzw. Unwissenheit bezüglich der Aufhebung von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf Autobahnabschnitten mit WVA bestehen, erscheint dieses Ergebnis bemerkenswert.

Auf Grund des großen Bewusstseins über die eigene Geschwindigkeit und die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist davon auszugehen, dass, wenn von den Fahrzeugführern die zulässige Höchstgeschwindigkeit übertreten wird, dies meist bewusst geschieht. Für Autobahnen allgemein gaben ca. 50 % der Teilnehmer an, dass sie die zulässige Höchstgeschwindigkeit häufig um 10 km/h bis 20 km/h übertreten. Auf Autobahnabschnitten mit WVA begehen nach eigener Aussage signifikant weniger Teilnehmer eine Übertretung in diesem Ausmaß (ca. 37 %). Die Umfrageergebnisse deuten daher darauf hin, dass die von einer WVA angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit von den Fahrzeugführern besser akzeptiert wird als die einer festen Beschilderung. Mit zunehmendem Betrag der Übertretung nahm der Anteil der Übertreter in der Umfrage erwartungsgemäß ab. Übertretungen von mehr als 20 km/h werden laut Umfrage nur von einer Minderheit begangen.

Im Bezug auf die Forschungsfrage 1, welche allgemein die Fahrmanöver in Geschwindigkeitsüberwachungssituationen thematisiert, zeigten die Umfrageergebnisse, dass die bevorzugte Reaktion im Überwachungsfall darin besteht ein Verzögerungsmanöver durchzuführen. Die Häufigkeiten, mit denen diese Verzögerungsmanöver auftreten bewegten sich in der Umfrage zwischen ca. 50 % und ca. 80 %. Die Umfrageergebnisse deuten außerdem darauf hin, dass auf Autobahnen mit WVA im Überwachungsfall unnötige Verzögerungsmanöver durchgeführt werden. Der Anteil der unnötigen Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver konnte mit ca. 33 % abgeschätzt werden. Die unnötigen Verzögerungsmanöver haben gemäß der Umfrageergebnisse ihre Ursache zum einen darin, dass die Autofahrer im Überwachungsfall ihr ausgeprägtes Geschwindigkeitsbewusstsein in Frage stellen und zum anderen, dass benachbarte Autofahrer bremsen und dieses Verhalten imitiert wird. Die Verkehrsflussmessungen im folgenden Kapitel 5 werden weitere Aufschlüsse zur Forschungsfrage 1 liefern.

Teilweise berichten die Umfrageteilnehmer von kritischen Verzögerungsmanövern im Überwachungsfall. Die Umfrage lieferte somit erste Hinweise für die Antwort der For-

schungsfrage 3, welche explizit nach kritischen Verzögerungsmanövern fragt. Auch diese Forschungsfrage wird im Kapitel 5 weiter untersucht.

Bezüglich der Hinweisschilder, die eine Überwachungssituation ankündigen, äußerte der Großteil der Befragten, dass diese die Aufmerksamkeit der Autofahrer erhöhen. Bei den Verkehrsflussmessungen auf der B6 wird dies messtechnisch überprüft werden (siehe Abschnitt 5.3).



## 5. Auswertung der Verkehrsflussmessungen

In diesem Kapitel werden die Verkehrsflussmessungen von der A1, der A2 und der B6 vorgestellt und ausgewertet. Die Messergebnisse von der A1 und der A2 werden relevant sein für die Betrachtung der Fahrmanöver, des Verkehrsflusses und der Verkehrssicherheit, Themenschwerpunkt I (Forschungsfragen 1 bis 5), im Bezug auf Streckenabschnitte mit punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten, die in Kombination mit einer WVA betrieben werden. Die Ergebnisse zur A1 und A2 werden außerdem Antworten auf die Forschungsfragen 6 und 7 liefern, welche die kombinierte Wirkung von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA auf die Verkehrssicherheit betrachten (Themenschwerpunkt II). Für die Beantwortung der Forschungsfragen 1 bis 5 im Bezug zur Abschnittskontrolle und im Bezug zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung ohne WVA-Anbindung werden die Verkehrsflussmessungen auf der B6 dienen. Die Verkehrsflussdaten von der B6 werden außerdem die Beantwortung der Forschungsfragen 8 und 9 ermöglichen, die dem Vergleich der Abschnittskontrolle in Deutschland mit den Anlagen des Auslands und mit der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung dienen (Themenschwerpunkt III).

Die bereits aus der Umfrage bekannten Informationen bezüglich der Forschungsfragen 1 und 3 (siehe Kapitel 4) werden hier bei der Diskussion der Ergebnisse der Verkehrsflussmessungen mit aufgegriffen.

Die Ergebnisse weiterer Verkehrsflussmessungen, die auf der A3 und der A71 durchgeführt wurden, sind im Anhang A zu finden. Wie auf der A1 und der A2 so wurden auch auf der A3 und der A71 punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte in Kombination mit WVA betrachtet. Die Ergebnisse von der A3 und der A71 werden aber nicht in diesem Kapitel vorgestellt, weil die bei diesen Untersuchungen aufgezeichneten Messdaten keine Informationen über die einzelnen Fahrmanöver enthalten und daher die gestellten Forschungsfragen nicht so detailliert beantworten, wie das auf der A1, der A2 und der B6 der Fall ist.

### 5.1. Verkehrsflussmessungen auf der A1 bei Bremen

In diesem Abschnitt werden die Verkehrsflussmessungen von der A1 vorgestellt und ausgewertet. Der Abschnitt beginnt zunächst mit der Auswertung des Verkehrsflusses des gesamten Streckenabschnitts. Danach folgt die Betrachtung der Fahrmanöver und des Verkehrsflusses in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort. Diese Betrachtung wird Antworten zu den Forschungsfragen 1 und 2 für die A1 bei Bremen liefern

(Betrachtung der Fahrmanöver und des Verkehrsflusses). Die Forschungsfragen 3 bis 6 (Betrachtung der Verkehrssicherheit und der kombinierten Wirkung von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA auf die Verkehrssicherheit) werden anschließend mit Hilfe von SSM für die A1 bei Bremen beantwortet. Die genannten Forschungsfragen werden hier auf der A1 bei Bremen immer für den speziellen Fall des kombinierten Betriebs von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA betrachtet.

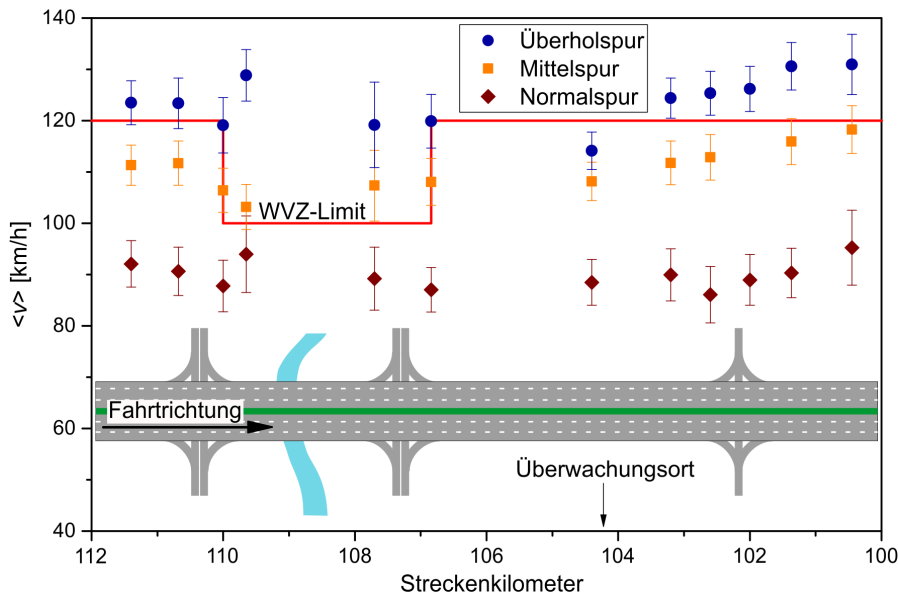
### 5.1.1. Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A1)

Für jede der beiden Fahrtrichtungen (Fahrtrichtung Hamburg und Fahrtrichtung Osnabrück) auf der A1 bei Bremen gibt es einen Anzeigequerschnitt der WVA, an dem punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung betrieben wird. Die Komponenten der Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte befinden sich teilweise am Fuß des jeweiligen Anzeigequerschnitts und teilweise oben auf dem jeweiligen Anzeigequerschnitt.

Im ersten Schritt der Verkehrsflussmessungen auf der A1 wurde das Geschwindigkeitsprofil des gesamten Streckenabschnitts in beiden Fahrtrichtungen untersucht. Dafür wurde ausschließlich auf die Sensoren der WVA zurückgegriffen. Die Geschwindigkeitsmessdaten dieser Sensoren lagen in Form von Minutenmittelwerten in der VRZ vor. Von dort wurden die Messdaten für 5 Werktage abgerufen und ausgewertet.

Die Auswertung der Geschwindigkeitsmessdaten erstreckte sich für jeden Werktag über ausgewählte Untersuchungszeiträume. Die Länge der Untersuchungszeiträume variierte zwischen 2 bis 4 Stunden, so dass in einem Untersuchungszeitraum 120 bis 240 Minutenmittelwerte Berücksichtigung fanden. Bei der Auswahl der Untersuchungszeiträume wurde darauf geachtet, dass in diesen Zeiträumen ein stabiler und freier Verkehrszustand am Überwachungsort vorlag und sich die angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit eines jeden Anzeigequerschnitts nicht änderte. In den hier durchgeführten empirischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich auf der A1 ein stabiler und freier Verkehrszustand am Überwachungsort durch zwei Merkmale auszeichnet. Die WVA musste eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h anzeigen und die mittlere Geschwindigkeit auf der Überholspur am Überwachungsort musste mehr als 110 km/h betragen. Die Minutenmittelwerte eines Untersuchungszeitraums wurden für jeden Messquerschnitt jeweils fahrspurselektiv gemittelt. Die sich aus dieser Mittelwertbildung ergebenden Geschwindigkeitsmittelwerte und Standardabweichungen wurden verwendet, um das Geschwindigkeitsprofil der A1 auf dem untersuchten Streckenabschnitt zu beschreiben.

In den Abbildungen 5.1 und 5.2 werden die Geschwindigkeitsprofile der A1 bei Bremen für die Fahrtrichtungen Hamburg und Osnabrück für zwei repräsentative Untersuchungszeiträume dargestellt. Die Messdaten stammen von zwei unterschiedlichen Werktagen. Der jeweilige Untersuchungszeitraum erstreckte sich in beiden Fahrtrichtungen über 4 Stunden. In diesen Zeiträumen passierten je nach Fahrspur zwischen 4000 und 6000 Fahrzeuge pro Spur den Streckenabschnitt. Zu jedem dargestellten Mittelwert tragen daher zwischen 4000 und 6000 Fahrzeuge in Form von 240 Minutenmittelwerten bei. In den

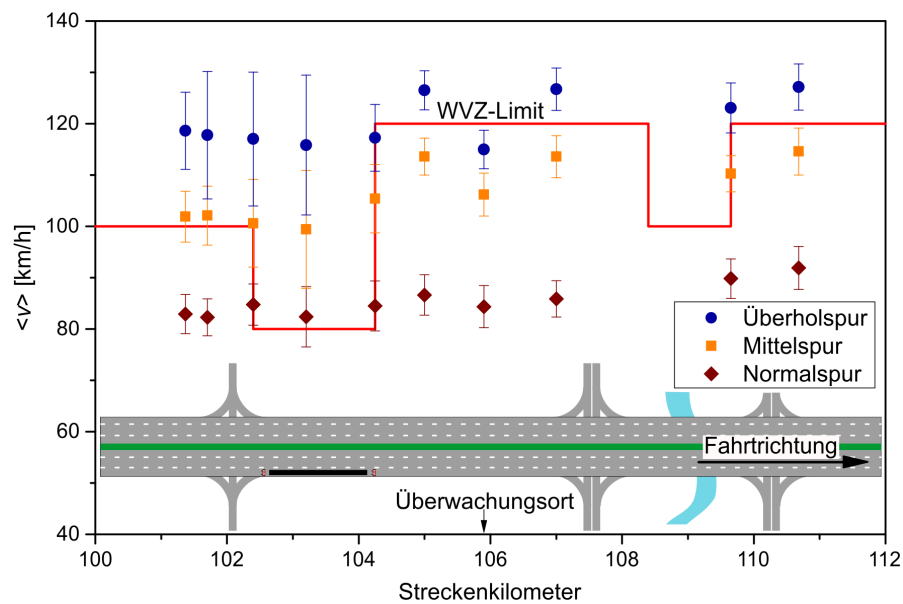


**Abbildung 5.1.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der A1 bei Bremen in der Fahrtrichtung Hamburg. Die Geschwindigkeitsüberwachung findet bei Streckenkilometer 104,4 statt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Minutenmittelwerten der Sensoren der WVA.

Abbildungen 5.1 und 5.2 sind neben den Messdaten auch schematische Darstellungen des Streckenabschnitts enthalten. Erläuterungen zu den Elementen der schematischen Darstellung finden sich im Anhang E.

Die von der WVA angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit (WVZ-Limit) wird in den Abbildungen 5.1 und 5.2 in Form einer durchgezogenen roten Linie dargestellt. In beiden Fahrtrichtungen zeigt das WVZ-Limit eine Ortsabhängigkeit. Für die Fahrtrichtung Hamburg besteht diese Ortsabhängigkeit auf Grund der Weserbrücke und eines Autobahnkreuzes zwischen den Streckenkilometern 110 und 107. In diesem Bereich wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf 100 km/h gesenkt. In der Fahrtrichtung Osnabrück (Abbildung 5.2) erfolgte während des Untersuchungszeitraums eine zeitweise Sperrung der Normalspur zwischen den Streckenkilometern 102,2 und 104,2. Im Bereich dieser Sperrung wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h und im Zulauf dazu auf 100 km/h begrenzt. Auf der Weserbrücke zwischen den Streckenkilometern 108,5 und 110 wurde in der Fahrtrichtung Osnabrück die zulässige Höchstgeschwindigkeit ebenfalls von 120 km/h auf 100 km/h reduziert.

Mit Hilfe von Differenztests wurde verifiziert (siehe Anhang C), dass bei den im Geschwindigkeitsprofil der A1 vorliegenden Standardabweichungen und Stichprobenumfängen Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsmittelwerten von mehr als 1,7 km/h bereits als



**Abbildung 5.2.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der A1 bei Bremen in der Fahrtrichtung Osnabrück. Die Geschwindigkeitsüberwachung findet bei Streckenkilometer 105,9 statt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Minutenmittelwerten der Sensoren der WVA.

signifikant zu bezeichnen sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %). Unter Berücksichtigung dieser Signifikanzgrenze wird anhand der Abbildungen 5.1 und 5.2 ersichtlich, dass sich die Geschwindigkeitsprofile aller Fahrspuren signifikant unterscheiden und somit jede Fahrspur ihr eigenes typisches Geschwindigkeitsprofil besitzt.

Der Verkehr auf den Normalspuren setzte sich aus PKW und LKW zusammen. Der LKW-Anteil betrug in den Untersuchungszeiträumen immer zwischen 60 % und 70 %. Da für LKW die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen 80 km/h beträgt, liegen die Geschwindigkeitsprofile der Normalspuren fast ausschließlich unter dem angezeigten Limit der WVA. Die Geschwindigkeitsmittelwerte auf den Normalspuren schwanken in beiden Fahrtrichtungen zwischen 80 km/h und 95 km/h.

Der Verkehr auf den Mittelspuren setzte sich ebenfalls aus PKW und LKW zusammen, wobei hier der LKW-Anteil nur ca. 5 % betrug und damit deutlich kleiner war als auf den Normalspuren. In den Geschwindigkeitsprofilen der Mittelspuren treten daher deutlich größere mittlere Geschwindigkeiten auf als auf den Normalspuren. Das Geschwindigkeitsprofil der Mittelspur der Fahrtrichtung Hamburg liegt im Bereich der Weserbrücke und des anschließenden Autobahnkreuzes (Streckenkilometer 110 bis 107) deutlich über der angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Für das Geschwindigkeitsprofil der Mittelspur in der Fahrtrichtung Osnabrück gilt ähnliches im Bereich der Fahrstreifenre-

duktion (Streckenkilometer 102,2 bis 104,2). Dies deutet auf eine schlechte Akzeptanz für die dortigen Höchstgeschwindigkeiten und damit niedrige Befolungsgrade hin. Die Geschwindigkeitsmittelwerte auf den Mittelspuren liegen in beiden Fahrtrichtungen in einem Bereich zwischen 100 km/h und 120 km/h.

Die Überholspuren wurden ausschließlich von PKW befahren. In den Geschwindigkeitsprofilen der Überholspuren treten daher im Vergleich zu den anderen beiden Fahrspuren die größten mittleren Geschwindigkeiten auf. Diese variieren in beiden Fahrtrichtungen zwischen 115 km/h und 130 km/h. Bis auf jeweils einen Messquerschnitt pro Fahrtrichtung liegen die mittleren Geschwindigkeiten der Überholspuren oberhalb bzw. maximal 3 km/h unterhalb des angezeigten Limits der WVA. Der Messquerschnitt, an dem auf der Überholspur der Geschwindigkeitsmittelwert mehr als 5 km/h unterhalb des angezeigten Limits liegt und die zugehörige Standardabweichung unterhalb des angezeigten Limits endet, befindet sich für die Fahrtrichtung Hamburg bei Streckenkilometer 104,4. Für die Fahrtrichtung Osnabrück befindet sich ein solcher Messquerschnitt bei Streckenkilometer 105,9. Der einzige Unterschied, durch den sich diese beiden Messquerschnitte von den jeweils benachbarten Messquerschnitten abheben, besteht darin, dass in unmittelbarer Umgebung zu diesen beiden Messorten sich stationäre Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte befinden. Anhand der Messdaten kann daher geschlussfolgert werden, dass diese punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte die mittlere Geschwindigkeit im Vergleich zu den benachbarten Messorten reduzieren. Für die Überholspuren kann diese Reduzierung mit  $-10$  km/h abgeschätzt werden. Für die Mittelspuren ergeben sich Reduzierungen von  $-3$  km/h bis  $-8$  km/h und für die Normalspuren von  $-1$  km/h bis  $-2$  km/h. Da in der Fahrtrichtung Hamburg vor dem Überwachungsort ein geeigneter Messquerschnitt fehlte, wurde bei der Bestimmung der Geschwindigkeitsreduzierungen in der Fahrtrichtung Hamburg nur der hinter dem Überwachungsort liegende Messquerschnitt verwendet. Die gefundenen Reduzierungen der mittleren Geschwindigkeiten für Mittel- und Überholspur sind signifikant (Signifikanzgrenze = 1,7 km/h) und in guter Übereinstimmung mit der Literatur (siehe Abschnitt 2.4.2). Die mittleren Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrspuren und Messorte ließen sich für die folgenden Werktage sehr gut reproduzieren.

Die Standardabweichungen der Geschwindigkeitsverteilungen sind ein Maß für die Streuungen der gefahrenen Geschwindigkeiten. Für die Fahrtrichtung Hamburg beträgt die Standardabweichung im Geschwindigkeitsprofil der Überholspur am Überwachungsort 3,7 km/h. An den beiden benachbarten Messorten beträgt diese Standardabweichung 3,9 km/h bis 5,2 km/h. Für die Fahrtrichtung Osnabrück ergeben sich ähnliche Werte. Dort beträgt für die Überholspur die Standardabweichung am Überwachungsort 3,8 km/h und an den beiden benachbarten Messorten 3,8 km/h bis 4,1 km/h. Die Werte der Standardabweichung der Überholspur liegen damit in beiden Fahrtrichtungen am Überwachungsort tendenziell unter den Werten der benachbarten Messorte. Die Differenz fällt aber meist nicht signifikant aus. Für die Normal- und die Mittelspur ergeben sich teilweise gegenläufige Trends, das heißt, dort ist die Standardabweichung am Überwachungsort teil-

weise größer als an den benachbarten Messorten. Der Vergleich der in den Abbildungen 5.1 und 5.2 dargestellten Standardabweichungen mit den Standardabweichungen weiterer Untersuchungszeiträume zeigte, dass diese stark vom jeweiligen Fahrerkollektiv abhängen und sich deshalb nicht so gut reproduzieren lassen wie die mittleren Geschwindigkeiten. Die vorliegenden Messdaten ermöglichten daher nicht die Bestimmung des Einflusses der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Streuungen der gefahrenen Geschwindigkeiten. Eine verkehrsflussharmonisierende Wirkung der Geschwindigkeitsüberwachung konnte anhand der Streuungen daher weder bestätigt noch widerlegt werden.

Die verkehrsflussharmonisierende Wirkung der Geschwindigkeitsüberwachung wird aber anhand des Vergleichs der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen benachbarten Fahrspuren deutlich. Für die Fahrtrichtung Hamburg beträgt am Überwachungsort die Differenz der Geschwindigkeitsmittelwerte von Überholspur und Mittelspur 6,0 km/h. An den benachbarten Messorten beträgt diese Differenz mindestens 11,9 km/h. Das heißt, die Geschwindigkeitsüberwachung senkt die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Überhol- und Mittelspur um ca. -6,0 km/h. Für die Normal- und die Mittelspur ergibt sich ebenfalls eine Absenkung. An den benachbarten Messorten beträgt die Differenz der Geschwindigkeitsmittelwerte von Normal- und Mittelspur mindestens 21,0 km/h. Am Überwachungsort wird diese Differenz um ca. -1,0 km/h auf 19,7 km/h gesenkt. In der Fahrtrichtung Osnabrück lässt sich der gleiche harmonisierende Effekt beobachten.

### Fazit

Anhand der Geschwindigkeitsprofile in den Abbildungen 5.1 und 5.2 bleibt festzuhalten, dass ein an eine WVA gekoppeltes punktuelles Geschwindigkeitsüberwachungsgerät die mittlere Geschwindigkeit reduziert, wie es bereits für punktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte ohne WVA-Anbindung bekannt ist (siehe Abschnitt 2.4.2). Die Geschwindigkeitsüberwachung erhöht deshalb den Befolgungsgrad für das angezeigte Limit am Überwachungsort. Der von punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten ohne WVA-Anbindung bekannte Einfluss, die Streuungen der gefahrenen Geschwindigkeiten zu reduzieren, konnte für die hier untersuchten Überwachungsgeräte weder bestätigt noch widerlegt werden. Es wurde aber gezeigt, dass auf der A1 bei Bremen die Geschwindigkeitsunterschiede benachbarter Fahrspuren mittels punktueller Geschwindigkeitsüberwachung reduziert werden können. Ein an eine WVA gekoppeltes punktuelles Geschwindigkeitsüberwachungsgerät führt somit zusätzlich zum erhöhten Befolgungsgrad zu einem homogenen Verkehrsfluss.

Der Wirkungsbereich eines solchen Überwachungsgerätes kann hier anhand der Abbildungen 5.1 und 5.2 nur grob mit ca. 1,0 km abgeschätzt werden. Diese Abschätzung ist ebenfalls in guter Übereinstimmung mit der Literatur.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse ermöglichen keine genaue Betrachtung der Fahrmanöver am Überwachungsort. Sie enthalten deshalb auch keine detaillierten Informationen bezüglich der Fahrmanöver, des Verkehrsflusses und der Verkehrssicher-

heit am Überwachungsort (Forschungsfragen 1 bis 5) bzw. der Wirkung von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA auf die Verkehrssicherheit (Forschungsfrage 6). Die im folgenden Abschnitt vorgestellten Verkehrsflussmessungen in der unmittelbaren Umgebung ( $\pm 100$  m) zu den beiden Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten werden eine genaue Analyse dieser Fahrmanöver ermöglichen und damit auch Antworten zu den Forschungsfragen 1 und 2 liefern (siehe Abschnitt 5.1.2). Die Forschungsfragen 3 bis 6 werden dann im Abschnitt 5.1.3 diskutiert.

#### 5.1.2. Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A1)

Damit die Wirkung auf den Verkehrsfluss, die von den punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten auf der A1 ausgeht, detaillierter betrachtet werden konnte, wurden die Fahrmanöver der Fahrzeugführer in der unmittelbaren Umgebung ( $\pm 100$  m) zu den beiden Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten auf der A1 analysiert. Dafür wurden zeitgleich zur Aufzeichnung der WVA-Messdaten mit Hilfe der Trackingradarsensoren (siehe Abschnitt 3.1.1) Verkehrsflussmessungen durchgeführt. Ziel war es, mit Hilfe dieser Verkehrsfluss- und Fahrmanöveranalyse die Forschungsfragen 1 und 2 für die A1 bei Bremen zu beantworten. Außerdem konnte auf diese Weise der räumliche Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung präziser abgeschätzt werden.

Zuerst wurden die Verkehrsflussmessungen am Überwachungsgerät der Fahrtrichtung Hamburg an zwei aufeinander folgenden Werktagen durchgeführt. Danach wurden die Trackingradarsensoren an zwei weiteren Werktagen am Überwachungsgerät der Fahrtrichtung Osnabrück verwendet, um den Verkehrsfluss zu bestimmen. Die Trackingradarsensoren wurden dazu jeweils auf dem Anzeigequerschnitt der WVA montiert, der sich beim jeweiligen Überwachungsgerät befand.

Am ersten Werktag einer jeden Fahrtrichtung wurden beide Trackingradarsensoren immer auf den ankommenden Verkehr justiert. Die Fahrzeuge bewegten sich somit an diesem ersten Werktag immer auf beide Trackingradarsensoren zu. Jeder Trackingradarsensor besitzt einen Erfassungsbereich von ca. 100 m Länge, wobei die Detektionsrate an den beiden Enden des Erfassungsbereiches auf Grund des begrenzten Öffnungswinkels bzw. der Signalamplitude stark absinkt. Um die sich auf das Überwachungsgerät zubewegenden Fahrzeuge über ca. 100 m zuverlässig zu detektieren wurde einer der beiden Trackingradarsensoren auf den Fernbereich (110 m bis 35 m) und der andere Sensor auf den Nahbereich (65 m bis 10 m) justiert. Der von beiden Trackingradarsensoren abgedeckte Erfassungsbereich befand sich somit in einer Entfernung zwischen 110 m und 10 m zu den Trackingradarsensoren. Der Öffnungswinkel eines jeden Trackingradarsensors ermöglichte die zeitgleiche Erfassung der Fahrzeuge aller 3 Fahrspuren. Auch wenn in Abbildung 3.1 nur 2 Fahrspuren dargestellt werden, so kann diese trotzdem einen guten Eindruck des Erfassungsbereiches vermitteln.

Am jeweils zweiten Werktag wurde immer der Sensor, der am ersten Tag den Fernbereich abdeckte, auf den abfließenden Verkehr gerichtet. Dieser Sensor erfasste die sich vom

Überwachungsgerät entfernenden Fahrzeuge erstmals in einer Entfernung von ca. 30 m und verfolgte diese bis in ca. 110 m Entfernung. Für den zweiten Werktag ergaben sich somit zwei Erfassungsbereiche. Der erste Erfassungsbereich betrachtete den ankommenden Verkehr in einer Entfernung zwischen 65 m bis 10 m zu den Trackingradarsensoren. Der abfließenden Verkehr wurde durch den zweiten Erfassungsbereich in einer Entfernung zwischen 30 m und 110 m zu den Trackingradarsensoren abgedeckt.

In dieser Arbeit wird der Erfassungsbereich der Trackingradarsensoren für den auf das Geschwindigkeitsüberwachungsgerät zufließenden Verkehr als Zufahrt bezeichnet. Der sich anschließende Bereich zwischen Geschwindigkeitsüberwachungsgerät und Anzeigequerschnitt wird ebenfalls noch der Zufahrt zugeordnet, auch wenn sich dieser Bereich meist in Fahrtrichtung gesehen hinter dem Überwachungsort befand. Damit wird berücksichtigt, dass die Fahrzeugführer nicht genau wissen, wo sich die Sensoren des Überwachungsgerätes konkret befinden. Weshalb auch anzunehmen ist, dass für den Großteil der Fahrzeugführer der Überwachungsdruck erst nach dem Passieren des Anzeigequerschnitts merklich abfällt. Der Erfassungsbereich der Trackingradarsensoren für den vom Anzeigequerschnitt abfließenden Verkehr wird in dieser Arbeit als Abfahrt bezeichnet.

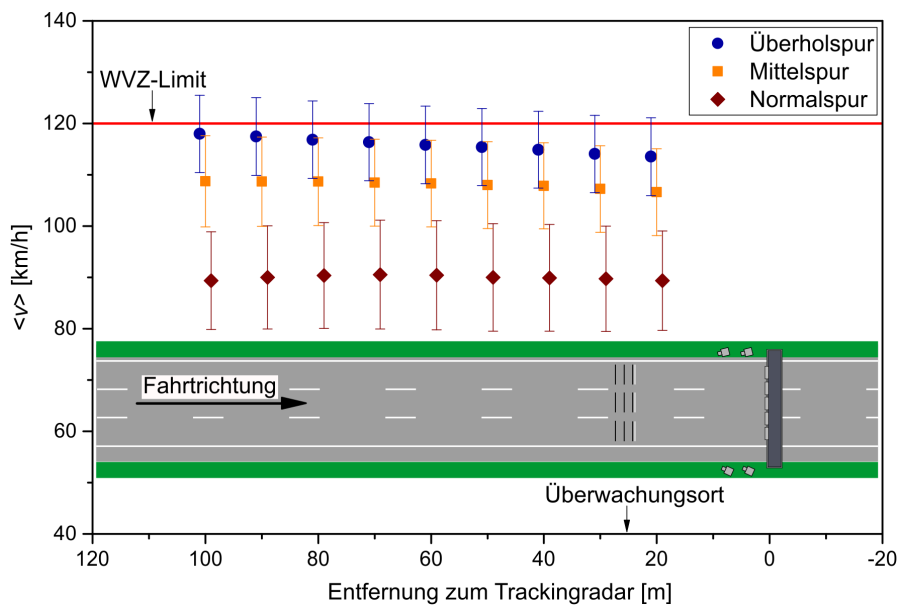
Die Messung des Verkehrsflusses mit Hilfe der Trackingradarsensoren erfolgte für dieselben Werktage und Auswertzeiträume, für die auch die Geschwindigkeitsprofile in Abschnitt 5.1.1 bestimmt wurden. Die Messdaten der Trackingradarsensoren lagen im Gegensatz zu den Messdaten der Sensoren der WVA nicht in Minutenmittelwerten sondern in Form von Einzelfahrzeugdaten vor.

Im Folgenden werden zunächst die Messdaten der Zufahrt des Überwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg und anschließend die Messdaten der Abfahrt dieses Überwachungsgerätes ausgewertet. Anschließend wird ein Vergleich zu den Messdaten der Fahrtrichtung Osnabrück gezogen.

### **Zufahrt**

Für die Untersuchung des Verkehrsflusses in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg wurden die von den Trackingradarsensoren für jedes Fahrzeug bestimmten Fahrzeugpositionen und Fahrzeuggeschwindigkeiten in ein 100 m langes räumliches Raster mit einer Intervalllänge von 10 m eingetragen. Das Raster erstreckte sich entlang der Fahrtrichtung. Die Rasterung der Messdaten der Trackingradarsensoren war nötig, weil diese Sensoren die Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten in äquidistanten Zeitschritten lieferten während die Auswertung dieser Daten anhand äquidistanter Wegintervalle erfolgen sollte. Fahrzeugpositionen und -geschwindigkeiten, die nicht zu einem der Rasterpunkte passten, wurden in der Auswertung vernachlässigt. Für jeden Rasterpunkt wurden die Geschwindigkeitswerte aller Fahrzeuge fahrspur selektiv gemittelt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen wurden danach über die Entfernungen der Rasterpunkte zu den Trackingradarsensoren aufgetragen. Daraus ergab sich ein detaillierter Verlauf der mittleren Geschwindigkeit





**Abbildung 5.3.:** Detaillierter Verlauf der mittleren Geschwindigkeit in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Die mittleren Geschwindigkeitswerte basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Die Mittelwerte wurden hier zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung über die Entfernung zu den Trackingradarsensoren aufgetragen. Die Mittelwerte der unterschiedlichen Fahrspuren werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier etwas versetzt auf der Abszisse dargestellt.

für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Dieser wird in Abbildung 5.3 dargestellt. In dieser Abbildung befindet sich außerdem eine schematische Darstellung für die unmittelbare Umgebung des Überwachungsortes. Erläuterungen zu den Elementen der schematischen Darstellung finden sich im Anhang E.

Die Messwerte der Rasterpunkte in den Entfernungen 110 m und 10 m wurden nicht mit in Abbildung 5.3 aufgenommen, weil sich in Vortests gezeigt hatte, dass für diese Entfernungen die Mittelwerte und Standardabweichungen durch Verdeckungseffekte und die unterschiedlichen Reflexionsvermögen der Fahrzeuge stark beeinflusst werden. Der Überwachungsort – der Ort an dem das Überwachungsgerät die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge misst – befindet sich in Abbildung 5.3 etwa bei einer Entfernung von 25 m. Die Messdaten, auf denen die Mittelwerte hier basieren, wurden im selben Zeitraum aufgezeichnet wie die Geschwindigkeitsmessdaten aus Abbildung 5.1. Im Vergleich zur Abbildung 5.1 wird in Abbildung 5.3 der Bereich in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort detailliert dargestellt.

Die Geschwindigkeitsverläufe der 3 Fahrspuren in Abbildung 5.3 sind signifikant verschieden. Dies wurde mittels Differenztests verifiziert. Auf Grund der vorliegenden Stan-

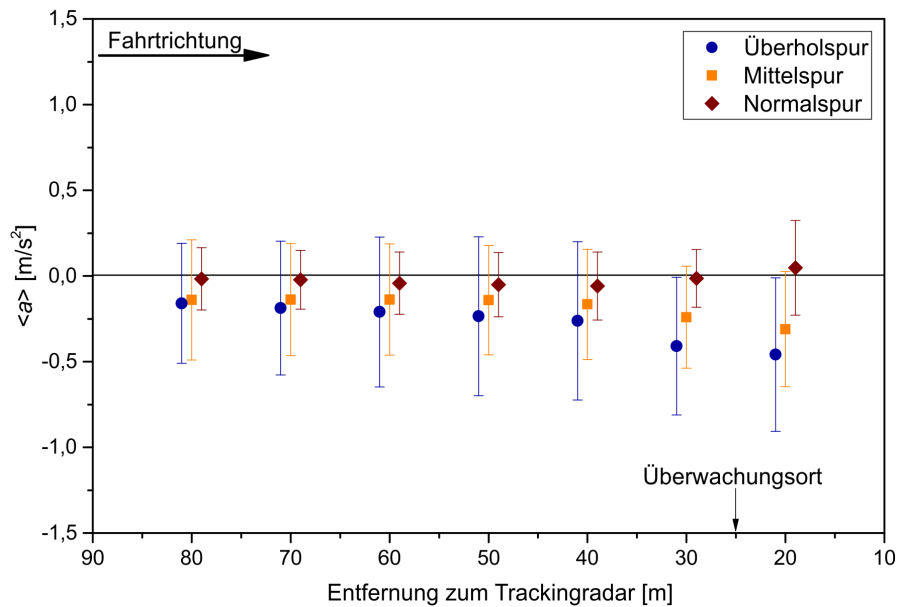
dardabweichungen und Stichprobenumfänge sind hier bereits Unterschiede in den Geschwindigkeitsmittelwerten der Trackingradarsensoren von mehr als 1,0 km/h signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %).

Für alle drei Fahrspuren liegen die mittleren Geschwindigkeiten in der gesamten Zufahrt unterhalb der von der WVA angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeit (WVZ-Limit). Für die Überholspur und die Mittelspur nimmt die mittlere Geschwindigkeit mit sinkender Entfernung signifikant ab (Signifikanzgrenze = 1,0 km/h). Das heißt, die Fahrzeugführer bevorzugen in dieser Zufahrt Verzögerungsmanöver und reduzieren somit ihre Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsreduzierung der Fahrzeuge, berechnet aus den mittleren Geschwindigkeiten bei 100 m und 20 m Entfernung zu den Trackingradarsensoren, beträgt für die Überholspur -4,4 km/h. Für die Mittelspur ergibt sich ein Wert von -2,1 km/h und für die Normalspur ein Wert von  $\pm 0,0$  km/h. Diese Werte fallen deutlich kleiner aus als die Reduzierungen, die dem Geschwindigkeitsüberwachungsgerät anhand der Profile der mittleren Geschwindigkeit (siehe Abschnitt 5.1.1) zugeschrieben wurden. Es kann daher geschlossen werden, dass die Fahrzeugführer bereits mehr als ca. 80 m (100 m - 25 m) vor dem Überwachungsort beginnen ihre Geschwindigkeit zu reduzieren.

In der Literatur wird der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung oftmals ein harmonisierender Einfluss auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten zugesprochen. Die in Abbildung 5.3 dargestellten Standardabweichungen stellen die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten für jede Fahrspur und jeden Entfernungswert dar. Diese Standardabweichungen zeigen keine signifikante Abhängigkeit von der Entfernung zum Überwachungsort. Es kann hier daher kein Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten festgestellt werden.

Aus den während des Trackings erfassten Fahrzeugpositionen und Fahrzeuggeschwindigkeiten konnten für jedes Fahrzeug mehrere Werte für die in Fahrtrichtung wirkenden Beschleunigungen abgeschätzt werden. Einer jeden Abschätzung wurde immer eine zurückgelegte Wegstrecke von 30 m zu Grunde gelegt. Abhängig vom Ort der ersten und letzten Erfassung ergaben sich für jedes Fahrzeug somit bis zu 8 Beschleunigungswerte, denen jeweils eine Entfernung zum Trackingradar zugeordnet werden konnte. Die Zahl 8 ergibt sich als Folge des ca. 100 m langen Erfassungsbereichs und der Tatsache, dass sich benachbarte Wegstreckenintervalle um 20 m überlappten (siehe Abschnitt 3.3). Als zugeordnete Entfernung wurde immer das Ende (in Fahrtrichtung gesehen) des jeweiligen Wegstreckenintervalls gewählt. Für alle Fahrzeuge, die im Untersuchungszeitraum den Überwachungsort passierten, wurden die Beschleunigungswerte bestimmt. Diese wurden anschließend fahrspurselektiv und in Abhängigkeit von der Entfernung gemittelt.

In Abbildung 5.4 sind die mittleren Beschleunigungen aller Fahrzeuge in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg über die Entfernung zu den Trackingradarsensoren aufgetragen worden. Die Standardabweichung ist in Form von Fehlerbalken eingetragen worden. Der Überwachungsort befindet sich in



**Abbildung 5.4.:** Detaillierter Verlauf der mittleren Beschleunigung in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Die mittleren Beschleunigungswerte basieren auf den Einzelfahrzeugdaten der Trackingradarsensoren. Die Mittelwerte wurden hier zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung über die Entfernung zu den Trackingradarsensoren aufgetragen. Die Mittelwerte der unterschiedlichen Fahrspuren werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier etwas versetzt auf der Abszisse dargestellt.

einer Entfernung von 25 m. Auf Grund des geringen Stichprobenumfangs wurden die mittleren Beschleunigungswerte für die Entfernung von 10 m nicht in Abbildung 5.4 mit aufgenommen.

Anhand des Verlaufs der mittleren Beschleunigungen über die Entfernung ist zu erkennen, dass für alle Entfernungen größer 25 m die mittleren Beschleunigungen in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes ausschließlich negative Werte annehmen. Dies lässt, in Übereinstimmung mit dem detaillierten Verlauf der mittleren Geschwindigkeit in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes (Abbildung 5.3) und dem Profil der mittleren Geschwindigkeit (Abbildung 5.1), den Schluss zu, dass die Fahrzeugführer in der Zufahrt ihre Fahrzeuggeschwindigkeit vorzugsweise reduzieren. Die mittleren Beschleunigungswerte sind betragsmäßig alle kleiner als  $0,5 \text{ m/s}^2$ . Diese kleinen Werte deuten darauf hin, dass der Großteil der Fahrzeugführer nur ein kurzes Verzögerungsmanöver durchführt bzw. sein Fahrzeug in der Zufahrt ausrollen lässt.

Die Überholspur zeigt die betragsmäßig größten Beschleunigungswerte und die Normalspur die betragsmäßig kleinsten. Die Werte der Mittelspur liegen zwischen denen der Normalspur und der Überholspur. Es kann daher angenommen werden, dass die Fahrzeug-

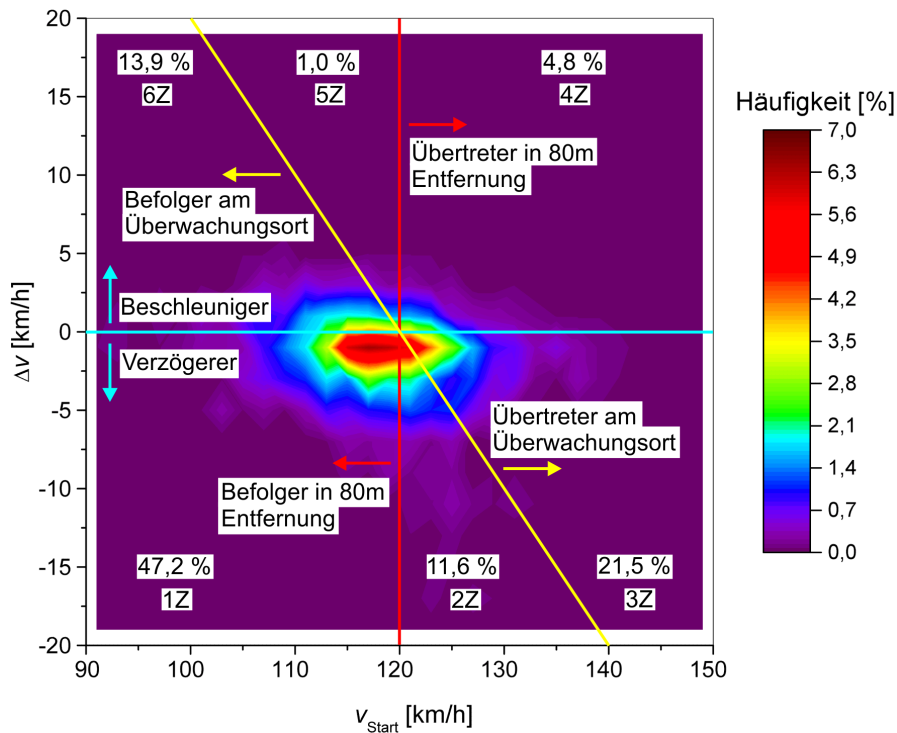
fürer im Überwachungsfall umso stärker verzögern, je höher ihre eigene Geschwindigkeit ist. Dieses Ergebnis korrespondiert ebenfalls mit den bereits dargestellten Ergebnissen. Betrachtet man die Entfernungsabhängigkeit der mittleren Beschleunigungswerte für Entfernungen größer 25 m genauer, so ist festzustellen, dass besonders für Mittelspur und Überholspur die mittlere Beschleunigung mit sinkender Entfernung zum Überwachungsort betragsmäßig zunimmt. Das heißt, je näher die Fahrzeugführer dem Überwachungsort kommen, umso besser können sie die Überwachungssituation erkennen und umso wahrscheinlicher werden Verzögerungsmanöver.

Da die Trackingradarsensoren Einzelfahrzeugdaten zur Verfügung stellen, bieten die aufgezeichneten Daten neben der Betrachtung des detaillierten Verlaufs der mittleren Geschwindigkeiten und der mittleren Beschleunigungen auch die Möglichkeit die Geschwindigkeitsänderung eines jeden Fahrzeugs einzeln zu analysieren. Mit Hilfe dieser Analyse können Aussagen über das individuelle Fahrverhalten eines jeden Fahrzeugs in der Zufahrt getroffen werden.

Die beiden eingesetzten Trackingradarsensoren führen unabhängig von einander ihr jeweiliges Fahrzeugtracking durch. Es war nicht möglich die Tracks des Sensors, der auf den Fernbereich gerichtet war und die Fahrzeuge zuerst detektierte, an den zweiten Sensor zu übergeben. Da der zweite Sensor einen kleineren Erfassungsbereich besaß, wurden für die Betrachtung der individuellen Geschwindigkeitsänderung eines jeden einzelnen Fahrzeugs in der Zufahrt daher nur die Einzelfahrzeugdaten des Sensors, der auf den Fernbereich gerichtet war, verwendet.

In Abbildung 5.5 wird die Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen, welche die Fahrzeuge in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg auf der Überholspur erfahren haben, in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit dargestellt. Als Startgeschwindigkeit wird hier die Geschwindigkeit bezeichnet mit der das jeweilige Fahrzeug erstmals innerhalb des Erfassungsbereiches des Trackingradars, das auf den Fernbereich gerichtet war, registriert wurde (ca. bei 110 m Entfernung). Die Geschwindigkeitsänderung berechnet sich über die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Fahrzeugs am Ende des Erfassungsbereichs (ca. bei 35 m Entfernung) und der Startgeschwindigkeit. Es wurden hier nur Fahrzeuge betrachtet, die bei Entfernungen größer 98 m erstmals vom Trackingradar detektiert wurden und bis zu Entfernungen kleiner 32 m verfolgt werden konnten. Der dargestellten Häufigkeitsverteilung liegen die Geschwindigkeitsänderungen von ca. 1500 Fahrzeugen zu Grunde.

Die Fahrmanöver der Zufahrt können in 6 Klassen eingeteilt werden. In Abbildung 5.5 werden diese Klassen mit Hilfe von Geraden gegeneinander abgegrenzt. In Tabelle 5.1 werden die 6 Fahrmanöverklassen einzeln beschrieben. Die horizontale hellblaue Gerade in Abbildung 5.5 grenzt die Fahrzeugführer, die in der Zufahrt beschleunigt haben ( $4Z + 5Z + 6Z$ ), gegen die Fahrzeugführer ab, die in der Zufahrt verzögert haben ( $1Z + 2Z + 3Z$ ). Die vertikale rote Gerade unterscheidet zwischen den Übertretern ( $2Z + 3Z + 4Z$ )



**Abbildung 5.5.:** Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Die Geschwindigkeitsänderung basiert für jedes Fahrzeug auf der Differenz zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten am Anfang und Ende der Zufahrt, die mit Hilfe eines Trackingradarsensors erfasst wurden. Die Entfernungsangaben beziehen sich auf den Überwachungsort.

und Befolgern (1Z + 5Z + 6Z) in 80 m Entfernung zum Überwachungsort. Die gelbe Gerade trennt die Übertreter am Überwachungsort (3Z + 4Z + 5Z) von den Befolgern am Überwachungsort (1Z + 2Z + 6Z).

In Tabelle 5.2 wird für die Überholspur die Verteilung der Fahrzeugführer auf die 6 Fahrmanöverklassen aufgeführt. Diese Verteilung wird hier ausschließlich für die Überholspur angegeben, weil nur für die Überholspur angenommen werden kann, dass für alle Fahrzeugführer die zulässige Höchstgeschwindigkeit 120 km/h betrug. Der Tabelle 5.2 ist zu entnehmen, dass der Großteil der Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit, die unterhalb des von der WVA angezeigten Limits liegt, erstmals detektiert wird. Der Befolgungsgrad in ca. 80 m Entfernung vor dem Überwachungsgerät beträgt 62,1 % (1Z + 5Z + 6Z). Laut Umfrage sind 62,5 % der Fahrer keine wissentlichen Übertreter. Der hier festgestellte Befolgungsgrad passt daher sehr gut zu den Umfrageergebnissen. Trotzdem diese Fahrzeugführer in einer Entfernung von etwa 80 m die zulässige Höchstgeschwindigkeit einhalten, kann bei vielen von ihnen (47,2 % der Fahrzeugführer insgesamt) eine

Klasse	Beschreibung Fahrmanöver
1Z	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 80 m vor dem Überwachungsgerät befolgen und in der Zufahrt verzögern und damit am Überwachungsort ebenfalls keine Geschwindigkeitsübertretung begehen
2Z	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 80 m vor dem Überwachungsgerät nicht befolgen und in der Zufahrt so stark verzögern, dass sie am Überwachungsort keine Geschwindigkeitsübertretung mehr begehen
3Z	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 80 m vor dem Überwachungsgerät nicht befolgen und in der Zufahrt zwar verzögern, aber am Überwachungsort weiterhin eine Geschwindigkeitsübertretung begehen
4Z	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 80 m vor dem Überwachungsgerät nicht befolgen und in der Zufahrt beschleunigen, so dass sie am Überwachungsort weiterhin eine Geschwindigkeitsübertretung begehen
5Z	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 80 m vor dem Überwachungsgerät befolgen und in der Zufahrt so stark beschleunigen, dass sie am Überwachungsort eine Geschwindigkeitsübertretung begehen
6Z	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 80 m vor dem Überwachungsgerät befolgen und in der Zufahrt nur so stark beschleunigen, dass sie am Überwachungsort weiterhin keine Geschwindigkeitsübertretung begehen

**Tabelle 5.1.:** Übersicht über die Klassen der Fahrmanöver der Fahrzeugführer in der Zufahrt.

Klasse	1Z	2Z	3Z	4Z	5Z	6Z
Anteil [%]	47,2	11,6	21,5	4,8	1,0	13,9

**Tabelle 5.2.:** Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt der Überholspur in der Fahrtrichtung Hamburg.

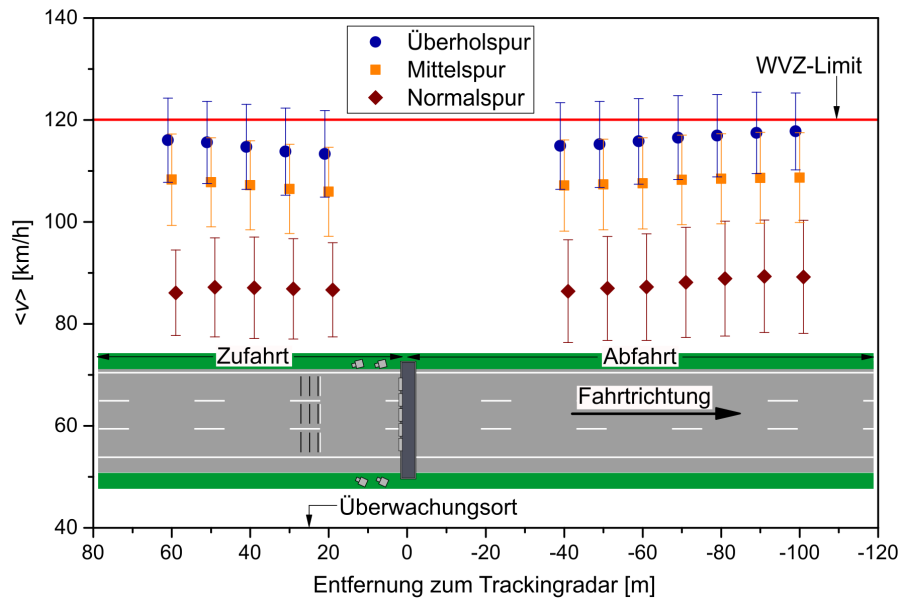
Geschwindigkeitsreduzierung und somit ein Verzögerungsmanöver festgestellt werden. Dieses Messergebnis bestätigt die Erkenntnis aus der Umfrage, wobei in der Umfrage die relative Häufigkeit nur mit 29,10 % beziffert werden konnte. Der Anteil der Geschwindigkeitsreduzierungen bzw. der Verzögerungsmanöver insgesamt entspricht 80,3 % (1Z + 2Z + 3Z) und fällt damit höher aus als es die Umfrageergebnisse hätten erwarten lassen. Laut Umfrage verzögert nur etwa die Hälfte der Fahrzeugführer im Überwachungsfall. Es gibt aber auch einige wenige Übertreter, die sich offensichtlich der Überwachungssituation nicht bewusst werden und ihre Geschwindigkeit in der Zufahrt weiter erhöhen. Ihr Anteil liegt bei 5,8 % (4Z + 5Z). Am Überwachungsgerät selbst wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 72,7 % (1Z + 2Z + 6Z) der Fahrzeugführer befolgt. Der Befolgungsgrad wird durch das Überwachungsgerät damit selbst auf der nur 80 m langen Zufahrt nachweislich erhöht.

#### **Abfahrt**

Am zweiten Messtag der Fahrtrichtung Hamburg wurde der Radarsensor, der am ersten Tag auf den Fernbereich der Zufahrt justiert war, auf die Abfahrt gerichtet. Da der andere Radarsensor nach wie vor den Verkehr der Zufahrt erfasste, konnten am zweiten Messtag die Fahrzeugpositionen und Fahrzeuggeschwindigkeiten gleichzeitig in Zu- und Abfahrt bestimmt werden. Für die Untersuchung des Verkehrsflusses in der Abfahrt wurden die Fahrzeugpositionen und Fahrzeuggeschwindigkeiten analog zur Zufahrt in ein 100 m langes räumliches Raster eingetragen. Wie in der Zufahrt so wurden auch in der Abfahrt nur die Rasterpunkte bei der Auswertung berücksichtigt, bei denen die Mittelwerte und Standardabweichungen kaum durch Verdeckungseffekte und die unterschiedlichen Reflexionsvermögen der Fahrzeuge beeinflusst wurden. Diese Randbedingung führte dazu, dass am zweiten Messtag in der Abfahrt die mittleren Geschwindigkeiten im Entfernungsbereich –40 m bis –100 m betrachtet werden konnten. Den Rasterpunkten der Abfahrt wurden negative Entfernungswerte zugeordnet. Für die Zufahrt ergab sich analog ein Betrachtungsbereich zwischen Entfernungen von 60 m bis 20 m.

Die fahrspurselektiv bestimmten Mittelwerte und Standardabweichungen wurden über die Entfernungen der Rasterpunkte zu den Trackingradarsensoren aufgetragen. Es ergab sich somit ein detaillierter Verlauf der mittleren Geschwindigkeit für die Zu- und Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Dieser wird in Abbildung 5.6 dargestellt. Der Überwachungsort befindet sich etwa bei einer Entfernung von 25 m.

Die drei Fahrspuren weisen in Abbildung 5.6 wieder untereinander signifikant verschiedene Geschwindigkeitsverläufe auf (Signifikanzgrenze = 1,0 km/h). Sowohl in der Zufahrt als auch in der Abfahrt liegen alle mittleren Geschwindigkeitswerte unterhalb des angezeigten Limits der WVA. In der Zufahrt ist ein Absinken der mittleren Geschwindigkeit mit betragsmäßig sinkender Entfernung zu erkennen. Die Werte der Zufahrt unterscheiden sich nicht signifikant von denen des Vortags (siehe Abbildung 5.3). In der Abfahrt steigt die mittlere Geschwindigkeit mit der betragsmäßig zunehmenden Entfernung an.



**Abbildung 5.6.:** Detaillierter Verlauf der mittleren Geschwindigkeit in der Zu- und Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Die mittleren Geschwindigkeitswerte basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Die Mittelwerte wurden hier zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung über die Entfernung zu den Trackingradarsensoren aufgetragen. Die Mittelwerte der unterschiedlichen Fahrspuren werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier etwas versetzt auf der Abszisse dargestellt.

Das heißt, in der Abfahrt werden bevorzugt Beschleunigungsmanöver durchgeführt. In Folge dessen lässt sich am Überwachungsort ein lokales Minimum der mittleren Geschwindigkeit nachweisen. Die Geschwindigkeitsdifferenz in der Abfahrt zwischen den Entfernungen  $-100$  m und  $-40$  m beträgt für die Überholspur im Mittel  $+2,9$  km/h. Für die Mittelspur ergibt sich entsprechend ein Anstieg der mittleren Geschwindigkeit von  $+1,6$  km/h und für die Normalspur von  $+2,8$  km/h. Die Geschwindigkeitsänderungen in der Abfahrt sind damit alle signifikant.

Es ist hier bemerkenswert, dass auf der Normalspur in der Zufahrt keine Geschwindigkeitsänderung zu verzeichnen ist, während in der Abfahrt ein Anstieg der mittleren Geschwindigkeit nachweisbar ist. In Verbindung mit Abbildung 5.3 deutet dies darauf hin, dass die Fahrzeugführer auf der Normalspur, im Gegensatz zu den Fahrzeugführern auf Mittel- und Überholspur, ihre Geschwindigkeit bereits mehr als  $80$  m vor dem Überwachungsgerät ausreichend reduziert haben und hinter dem Überwachungsort wie die Fahrzeugführer auf der Mittel- und der Überholspur beschleunigen. Dies spricht dafür, dass die Fahrzeugführer der Normalspur eine bessere Kenntnis über den Überwachungsort besitzen als die Fahrzeugführer auf Mittel- und Überholspur.



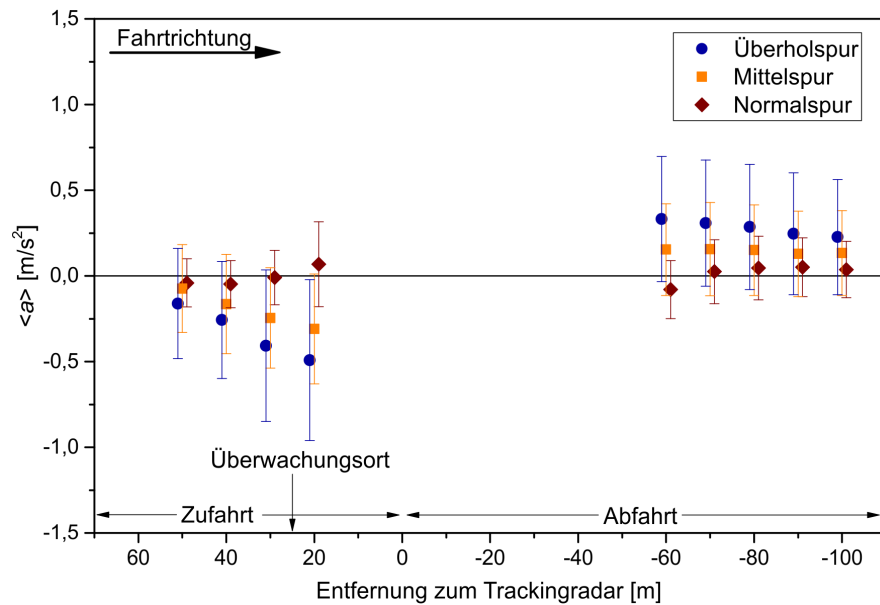
Anhand der Geschwindigkeitsänderungen auf der Überholspur in Abbildung 5.6 und der Kenntnis über die geschwindigkeitssenkende Wirkung der Überwachung von insgesamt ca. 10 km/h für die Überholspur (siehe Abschnitt 5.1.1) kann der Wirkungsbereich des punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg abgeschätzt werden. Für diese Abschätzung ist zusätzlich die Annahme nötig, dass sich die Geschwindigkeitsreduzierungen in der Zufahrt und die Geschwindigkeitserhöhungen in der Abfahrt außerhalb des hier erfassten Bereichs, also für Entfernungen betragsmäßig größer 100 m, mit ähnlichen Anstiegen fortsetzen. Der abgeschätzte Wirkungsbereich beträgt damit  $2 \times 200 \text{ m} = 0,4 \text{ km}$ . Diese Abschätzung fällt deutlich kleiner aus als die Abschätzung des Wirkungsbereiches, die im Abschnitt 5.1.1 durchgeführt wurde. Da die Messdaten hier mit einer viel höheren örtlichen Auflösung vorliegen als im Abschnitt 5.1.1, ist anzunehmen, dass diese Abschätzung hier dem realen Wert deutlich näher kommt.

Eine Änderung der Standardabweichung der Geschwindigkeitsverteilung ist in Abbildung 5.6 nicht erkennbar. Ein Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten ist daher auch in der Abfahrt nicht nachweisbar.

Wie in der Zufahrt so wurde auch in der Abfahrt eine Bestimmung der auf die Fahrzeuge in Fahrtrichtung wirkenden Beschleunigungen anhand der Fahrzeuggeschwindigkeiten und -positionen vorgenommen. Die Mittelung der Beschleunigungswerte erfolgte wieder in Abhängigkeit von der Entfernung und fahrsपुरselektiv.

In Abbildung 5.7 sind die mittleren Beschleunigungen jeder Fahrsपुर über die Entfernung zum Trackingradar für Zu- und Abfahrt aufgetragen worden. Die Standardabweichung der jeweiligen Mittelwertbildung ist in Form von Fehlerbalken kenntlich gemacht worden. Die Stichprobenumfänge begrenzten hier den auswertbaren Entfernungsbereich zwischen 50 m und 20 m in der Zufahrt und zwischen  $-60 \text{ m}$  und  $-100 \text{ m}$  in der Abfahrt. Die mittleren Beschleunigungswerte der Zufahrt für diesen zweiten Messtag sind vergleichbar mit den Werten vom Vortag. In der Abfahrt zeigt sich anhand der positiven mittleren Beschleunigungen, dass dort Beschleunigungsmanöver dominieren. Betragsmäßig sind diese Mittelwerte vergleichbar mit der Zufahrt. In der Abfahrt werden auf der Überholspur im Mittel die größten Beschleunigungen erzielt, während auf der Normalspur die kleinsten Beschleunigungen auftreten. Mit zunehmender Entfernung zum Überwachungsort nehmen die Beschleunigungen in der Abfahrt der Überholspur ab. Es kann damit zusammengefasst werden, dass die Fahrzeugführer in der Zufahrt bevorzugt Verzögerungsmanöver und in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver durchführen.

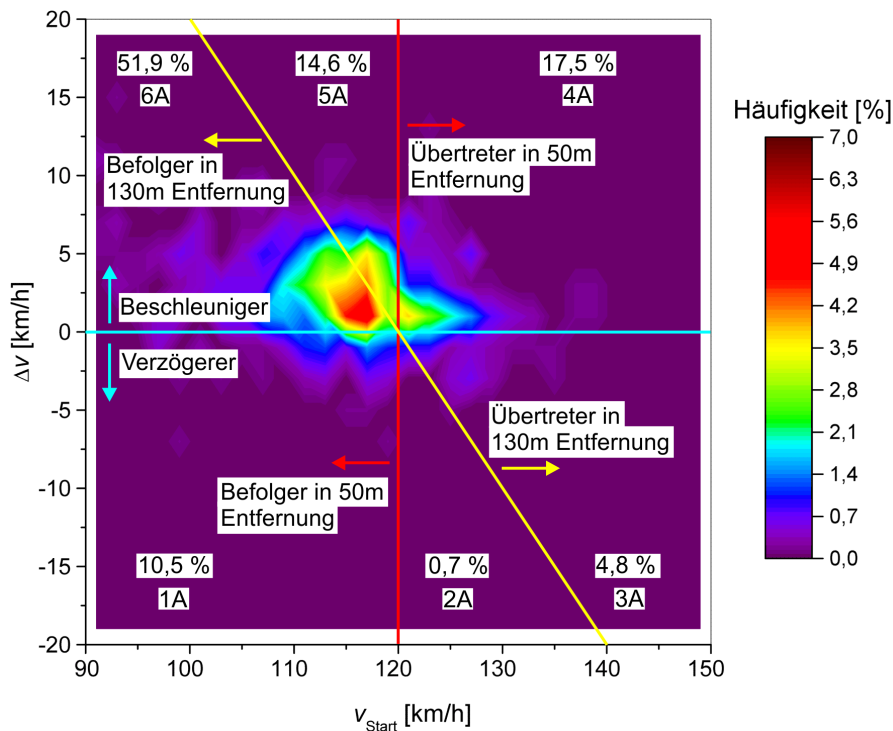
Für die Abfahrt konnten – analog zur Zufahrt – die Fahrmanöver mit Hilfe der individuellen Geschwindigkeitsänderung eines jeden Fahrzeugs detaillierter betrachtet werden. In Abbildung 5.8 wird die Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen dargestellt, welche die Fahrzeuge in der Abfahrt der Überholspur in Abhängigkeit von der jeweiligen Startgeschwindigkeit erfahren haben. Als Startgeschwindigkeit wird hier die Geschwindigkeit bezeichnet, mit der das jeweilige Fahrzeug vom auf den abflie-



**Abbildung 5.7.:** Detaillierter Verlauf der mittleren Beschleunigung in der Zu- und Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Die mittleren Beschleunigungswerte basieren auf den Einzelfahrzeugdaten der Trackingradarsensoren. Die Mittelwerte wurden hier zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung über die Entfernung zu den Trackingradarsensoren aufgetragen. Die Mittelwerte der unterschiedlichen Fahrspuren werden aus Gründen der Übersichtlichkeit hier etwas versetzt auf der Abszisse dargestellt.

ßenden Verkehr gerichteten Trackingradarsensor erstmals erfasst wurde (ca. bei  $-30$  m Entfernung). Die Geschwindigkeitsänderung eines Fahrzeugs berechnet sich über die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Fahrzeugs am Ende des Erfassungsbereichs (ca. bei  $-100$  m Entfernung) und der Startgeschwindigkeit. Es wurden hier nur Fahrzeuge betrachtet, die bei Entfernungen erstmals detektiert wurden, die betragsmäßig kleiner sind als  $-32$  m, und bis zu Entfernungen verfolgt werden konnten, die betragsmäßig größer sind als  $-98$  m. Der in Abbildung 5.8 dargestellten Häufigkeitsverteilung liegen die Geschwindigkeitsänderungen von ca. 700 Fahrzeugen zu Grunde.

Anhand von Abbildung 5.8 können die Fahrmanöver der Abfahrt in 6 Klassen eingeteilt werden. In Tabelle 5.3 werden die 6 Klassen beschrieben. Die hellblaue Gerade in Abbildung 5.8 dient der Unterscheidung zwischen den Fahrzeugführern, die in der Abfahrt beschleunigt haben ( $4A + 5A + 6A$ ), und denen, die in der Abfahrt verzögert haben ( $1A + 2A + 3A$ ). Die Übertreter ( $2A + 3A + 4A$ ) und Befolger ( $1A + 5A + 6A$ ) in  $50$  m Entfernung zum Überwachungsort werden hingegen mit Hilfe der roten Geraden unterschieden. Die gelbe Gerade trennt schließlich die Übertreter in  $130$  m Entfernung ( $3A + 4A + 5A$ ) von den Befolgern in  $130$  m Entfernung ( $1A + 2A + 6A$ ).



**Abbildung 5.8.:** Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit für die Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg. Die Geschwindigkeitsänderung basiert für jedes Fahrzeug auf der Differenz zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten am Anfang und Ende der Abfahrt, die mit Hilfe eines Trackingradarsensors erfasst wurden. Die Entfernungsangaben beziehen sich auf den Überwachungsort.

Auch in Abbildung 5.8 wird deutlich, dass die Fahrzeugführer der Überholspur in der Abfahrt bevorzugt zu Beschleunigungsmanövern tendieren. Es treten aber auch vereinzelt Geschwindigkeitsreduzierungen auf. Die 6 Fahrmanöverklassen in der Abfahrt sind unterschiedlich häufig im gesamten Fahrerkollektiv ausgeprägt (Tabelle 5.4). In der Abfahrt beträgt der Anteil der Verzögerungsmanöver nur noch 16,0 % (1A + 2A + 3A). 14,6 % (5A) der Fahrzeugführer beschleunigen in der Abfahrt so stark, dass sie ca. 130 m hinter dem Überwachungsort das zulässige Limit bereits überschreiten. Der Befolgungsgrad beträgt ca. 50 m hinter dem Überwachungsort 77,0 % (1A + 5A + 6A) und ca. 130 m hinter dem Überwachungsort 63,1 % (1A + 2A + 6A). Damit bestehen 130 m hinter dem Überwachungsort sehr ähnliche Befolgungsgrade wie 80 m vor dem Überwachungsort. Außerdem zeigt der Vergleich mit den Häufigkeiten der Zufahrt, dass der größte Befolgungsgrad nicht am Überwachungsort sondern in Fahrtrichtung gesehen ca. 50 m dahinter gemessen werden konnte. Ein Vergleich mit den Umfrageergebnissen ist für die Abfahrt nicht möglich, da im Fokus der Umfrage ausschließlich die Zufahrten von Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten standen.

Klasse	Beschreibung Fahrmanöver
1A	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 50 m hinter dem Überwachungsort befolgen und in der Abfahrt verzögern und damit ca. 130 m hinter dem Überwachungsort ebenfalls keine Geschwindigkeitsübertretung begehen
2A	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 50 m hinter dem Überwachungsort nicht befolgen und in der Abfahrt verzögern und damit ca. 130 m hinter dem Überwachungsort keine Geschwindigkeitsübertretung mehr begehen
3A	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 50 m hinter dem Überwachungsort nicht befolgen und in der Abfahrt verzögern und trotzdem ca. 130 m hinter dem Überwachungsort immer noch eine Geschwindigkeitsübertretung begehen
4A	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 50 m hinter dem Überwachungsort nicht befolgen und in der Abfahrt beschleunigen und damit ca. 130 m hinter dem Überwachungsort weiterhin eine Geschwindigkeitsübertretung begehen
5A	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 50 m hinter dem Überwachungsort befolgen und in der Abfahrt so stark beschleunigen, dass sie bereits ca. 130 m hinter dem Überwachungsort eine Geschwindigkeitsübertretung begehen
6A	Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit ca. 50 m hinter dem Überwachungsort befolgen und in der Abfahrt nur so stark beschleunigen, dass sie auch ca. 130 m hinter dem Überwachungsort keine Geschwindigkeitsübertretung begehen

**Tabelle 5.3.:** Übersicht über die Klassen der Fahrmanöver der Fahrzeugführer in der Abfahrt.

Klasse	1A	2A	3A	4A	5A	6A
Anteil [%]	10,5	0,7	4,8	17,5	14,6	51,9

**Tabelle 5.4.:** Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Abfahrt der Überholspur in der Fahrtrichtung Hamburg.

Fahrspur	Fahrtrichtung Hamburg		Fahrtrichtung Osnabrück	
	$\Delta v_{zu}$ [km/h]	$\Delta v_{ab}$ [km/h]	$\Delta v_{zu}$ [km/h]	$\Delta v_{ab}$ [km/h]
Normalspur	$\pm 0,0$	+2,8	-1,0	+2,5
Mittelspur	-2,1	+1,6	-2,2	+1,1
Überholspur	-4,4	+2,9	-3,8	+2,9

**Tabelle 5.5.:** Mittlere Geschwindigkeitsänderungen in der unmittelbaren Umgebung der beiden Überwachungsorte für Zufahrt (zu) und Abfahrt (ab). Für die Zufahrt (Abfahrt) wurden die Geschwindigkeiten bei 20 m (-100 m) und 100 m (-40 m) Entfernung miteinander verglichen. Die angegebenen Entfernungswerte beziehen sich auf die Standorte der Trackingradarsensoren. Die Daten basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Geschwindigkeitsänderungen betragsmäßig größer 1,0 km/h gelten hier als signifikant.

Für die Fahrtrichtung Osnabrück findet sich im Vergleich zur Fahrtrichtung Hamburg am Überwachungsort ein nahezu identischer Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten. In Tabelle 5.5 werden die Geschwindigkeitsänderungen für beide Überwachungsorte gegenübergestellt. Auch die mittleren Beschleunigungen und die Verteilungen der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge in Zu- und Abfahrt sind für die Fahrtrichtung Osnabrück sehr ähnlich zu denen der Fahrtrichtung Hamburg. Es ergeben sich daher für die Fahrtrichtung Osnabrück dieselben Erkenntnisse zum Fahrverhalten in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsortes wie für die Fahrtrichtung Hamburg. Das Fahrverhalten der Fahrzeugführer am Überwachungsort auf der A1 bei Bremen ist daher nicht nur unabhängig vom Werktag, sondern auch unabhängig von der Fahrtrichtung bzw. vom Überwachungsort. Der Wirkungsbereich des punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Osnabrück konnte ebenfalls mit 0,4 km abgeschätzt werden.

## Fazit

Die detaillierte Analyse der individuellen Fahrmanöver in der unmittelbaren Umgebung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte beider Fahrtrichtungen hat auf der A1 bei Bremen gezeigt, dass in der Zufahrt von den Fahrzeugführern bevorzugt Verzögerungsmanöver und in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver durchgeführt werden (Forschungsfrage 1). Die Ergebnisse deuten außerdem daraufhin, dass je näher die Fahrzeugführer dem Überwachungsort kommen, umso wahrscheinlicher Verzögerungsmanöver werden und dass die bei diesen Verzögerungsmanövern auftretenden Beschleunigungswerte mit steigender Geschwindigkeit betragsmäßig zunehmen. Die auftretenden mittleren Verzögerungen und Beschleunigungen sind in Zufahrt und Abfahrt betragsmäßig gleich und betragen ca.  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

Bezüglich der Forschungsfrage 2, die der Betrachtung des Verkehrsflusses diene, kann für die A1 bei Bremen an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich die mittlere Ge-

schwindigkeit des Verkehrsflusses in der Zufahrt zum Überwachungsort je nach Fahrspur um  $\pm 0$  km/h bis ca.  $-4$  km/h verringert und in der Abfahrt um ca.  $+1$  km/h bis ca.  $+3$  km/h wieder erhöht. Schlussfolgerungen bezüglich der Verkehrssicherheit können an dieser Stelle noch nicht gezogen werden. Dies wird im folgenden Abschnitt aber der Fall sein (siehe Abschnitt 5.1.3).

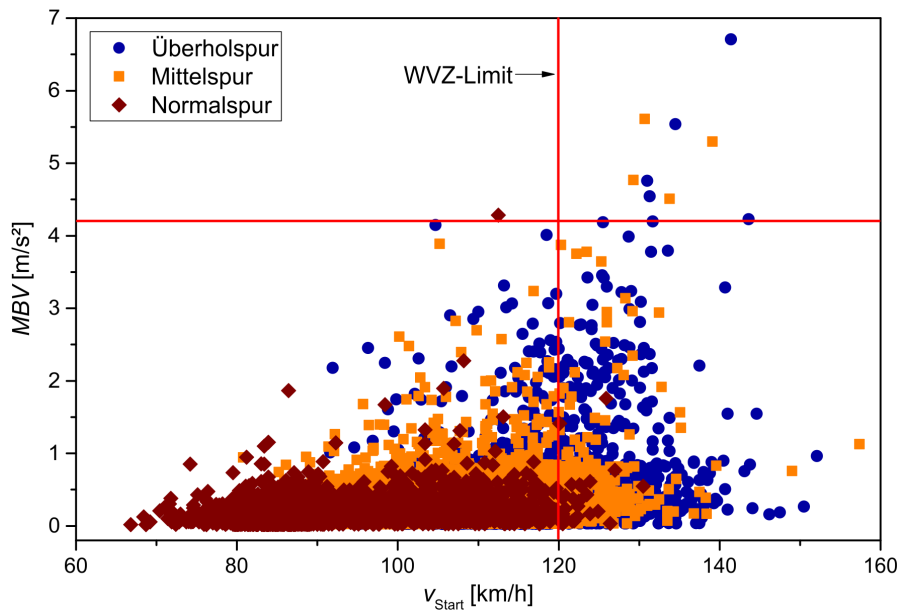
Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte hier mit  $0,4$  km abgeschätzt werden. Dieser Wert ist deutlich kleiner als die Abschätzung aus Abschnitt 5.1.1. Weil die Messdaten hier eine deutlich höhere örtliche Auflösung besitzen als im Abschnitt 5.1.1, ist anzunehmen, dass diese Abschätzung hier dem realen Wert deutlich näher kommt.

### 5.1.3. Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A1)

Die Verkehrssicherheit wird hier mittels SSM betrachtet. Als SSM kamen auf der A1 die Zeitlücke aufeinanderfolgender Fahrzeuge (THW), die Zeit bis zur Kollision (TTC) und die maximale Bremsverzögerung (MBV) zum Einsatz. Die Betrachtung dieser SSM erfolgte sowohl für die Zufahrt als auch für die Abfahrt. Für die Berechnung der SSM wurden immer die Einzelfahrzeugdaten der Trackingradarsensoren verwendet. Die THW und die TTC wurden jeweils für einen Punkt in einer kleinen Entfernung ( $\sim 30$  m) zum Trackingradar in der Zu- und Abfahrt bestimmt. Die MBV bezog sich hingegen auf die Einzelfahrzeugdaten der gesamten Zu- oder Abfahrt.

In Abbildung 5.9 sind für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg die ermittelten Werte der MBV über die Startgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs aufgetragen worden. Das gültige WVZ-Limit wird in dieser Abbildung durch eine senkrechte rote Linie und die Grenze zwischen kritischen und unkritischen MBV-Werten durch eine waagerechte rote Linie symbolisiert. MBV-Werte  $> 4,2$  m/s<sup>2</sup> werden in dieser Arbeit für Autobahnen als kritisch eingestuft. Dies entspricht einer Geschwindigkeitsreduzierung von  $130$  km/h auf  $100$  km/h innerhalb von  $2,0$  s. Wenn ein Fahrzeug eine solche Verzögerung durchführt und hinter diesem Fahrzeug ein weiteres Fahrzeug ( $130$  km/h) im Sicherheitsabstand von  $65$  m folgt, dann wird dieses nachfolgende Fahrzeug innerhalb von weiteren  $2,9$  s den ursprünglichen Sicherheitsabstand um mehr als die Hälfte unterschreiten, sofern es sich gleichförmig weiterbewegt. Das heißt, innerhalb einer Zeitspanne kleiner  $5$  s wird das hintere Fahrzeug durch das Verzögerungsmanöver des vorderen Fahrzeugs zu einer Reaktion gezwungen. Deshalb werden hier MBV-Werte  $> 4,2$  m/s<sup>2</sup> als kritisch eingestuft. Kritische MBV-Werte repräsentieren kritische Verzögerungsmanöver.

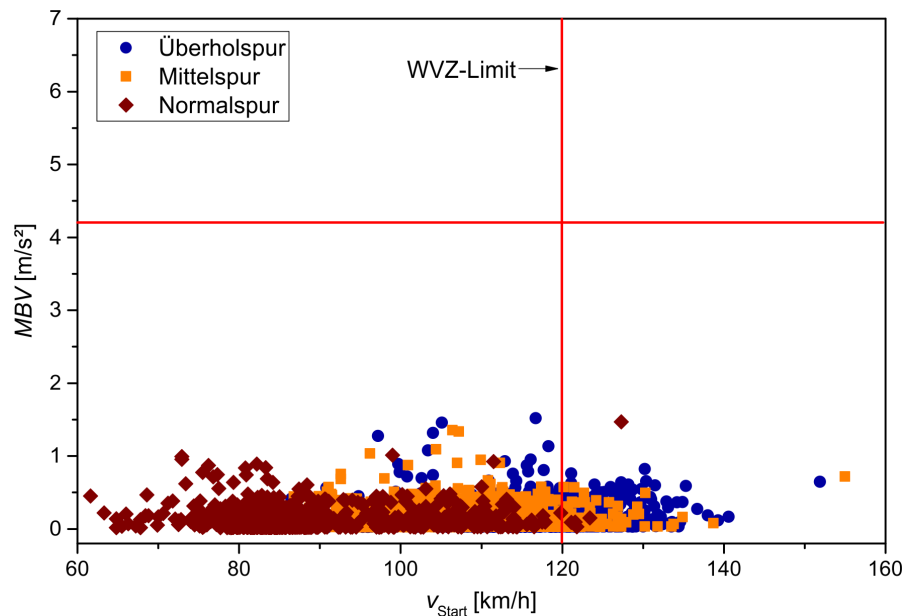
Die Verteilung der MBV-Werte in Abbildung 5.9 zeigt, dass diese in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit streuen. Die Streuung nimmt offensichtlich mit steigender Startgeschwindigkeit zu. Je höher die Geschwindigkeit ist, mit der sich die Fahrzeugführer dem Überwachungsgerät nähern, umso wahrscheinlicher werden kritische Verzögerungsmanöver. Es wird hier angenommen, dass die Übertreter einer Ahndung gern entgehen möchten



**Abbildung 5.9.:** Maximale Bremsverzögerung (MBV) der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg.

und deshalb entsprechend stark verzögern. Auf der Überholspur treten die meisten kritischen Werte der MBV auf, da dort deutlich höhere Geschwindigkeiten gefahren werden als auf den anderen beiden Fahrspuren. Für die Normalspur findet sich beispielsweise nur ein kritischer MBV-Wert. Dieser gehört zu einem Fahrzeugführer, der die zulässige Höchstgeschwindigkeit befolgt.

Auch wenn der Großteil der Verkehrsteilnehmer in der Zufahrt seine Geschwindigkeit nur moderat reduziert (siehe Abbildung 5.5), so zeigt Abbildung 5.9, dass vereinzelt kritische Verzögerungsmanöver auftreten. Diese Fahrmanöver stellen ein potenzielles Sicherheitsrisiko dar, da sie kritische Auffahr- oder Kollisionssituationen fördern können. Sie sind deshalb kontraproduktiv im Sinne der Verkehrssicherheit. Der relative Anteil dieser kritischen Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver hängt davon ab, welcher Grenzwert zur Unterscheidung von kritischen und unkritischen Verzögerungsmanövern gewählt wird. Für den Grenzwert von  $4,2 \text{ m/s}^2$ , der in dieser Arbeit für die Überwachungsstelle auf den Autobahnen angesetzt wurde, erreicht der Anteil kritischer Verzögerungsmanöver auf der Überholspur mit  $0,2 \%$  den größten Wert. Für die Fahrtrichtung Osnabrück konnte ein ähnlicher Wert von maximal  $0,4 \%$  gefunden werden. Die Reduzierung des Grenzwertes auf beispielsweise  $3,1 \text{ m/s}^2$  erhöht den Anteil kritischer Verzögerungsmanöver etwa um den Faktor 3. Die Änderung ist damit kleiner als eine Größenordnung. Die exakte Wahl des Grenzwertes hat hier deshalb keinen nennenswerten Einfluss auf die Häufigkeit kritischer Verzögerungsmanöver.



**Abbildung 5.10.:** Maximale Bremsverzögerung (MBV) der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit in der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg.

Weil die Häufigkeit der kritischen Verzögerungsmanöver hier deutlich kleiner ist als 5 %, ist anzunehmen, dass diese keine Häufung kritischer Kollisionssituationen zur Folge haben. Mit Hilfe der TTC wird diese Annahme weiter unten in diesem Abschnitt genauer überprüft.

In Abbildung 5.10 wird für die Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg die MBV in Abhängigkeit von der individuellen Startgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs dargestellt. Analog zur Zufahrt werden MBV-Werte  $> 4,2 \text{ m/s}^2$  als kritisch eingestuft. Kein einziges Fahrzeug überschreitet diesen Grenzwert. Insgesamt ist die Streuung des MBV in der Abfahrt deutlich kleiner als in der Zufahrt. In der Abfahrt ist damit kein Sicherheitsrisiko ersichtlich, welches auf kritische Verzögerungsmanöver zurückgeführt werden könnte. Da in der Abfahrt – im Gegensatz zur Zufahrt – keine Überwachungssituation besteht, kann anhand der Abbildungen 5.9 und 5.10 geschlossen werden, dass die kritischen Verzögerungsmanöver in der Zufahrt tatsächlich eine Folge der punktuellen Überwachung sind.

Wie bei der MBV so wurde auch für die THW die Häufigkeit kritischer Werte untersucht. Kritische THW-Werte repräsentieren kritische Auffahrsituationen. Als kritisch gilt ein THW-Wert  $\leq 1 \text{ s}$  [Vog03]. Zum Vergleich, die Halbe-Tacho-Faustformel für den Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug entspricht einem THW-Wert von 1,8 s. Die THWs der einzelnen Fahrzeuge wurden jeweils für eine definierte Entfernung zu den



Fahrspur	$\langle Q \rangle$ [KFZ/h]	$\langle v \rangle$ [km/h]	Häufigkeit THW $\leq 1$ s [%]
Normalspur	950	90,9	8,4
Mittelspur	1450	107,4	16,8
Überholspur	870	114,0	23,0

**Tabelle 5.6.:** Häufigkeit des Auftretens von THW  $\leq 1$  s für die 3 Fahrspuren in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg, zusammen mit mittlerer Geschwindigkeit  $\langle v \rangle$  und mittlerer Verkehrsstärke  $\langle Q \rangle$ .

Trackingradarsensoren in der Zu- und Abfahrt ermittelt (siehe Abschnitt 3.3). Für die Bestimmung der relativen Häufigkeit kritischer THWs wurde die Anzahl der kritischen Werte mit der Anzahl der THW-Werte  $\leq 6$  s ins Verhältnis gesetzt. Das heißt, Fahrzeuge mit einer THW  $> 6$  s blieben hier unberücksichtigt. Durch dieses Vorgehen wurde sichergestellt, dass nur Fahrzeuge betrachtet wurden, die sich tatsächlich in einer Nachfahrsituation befanden [Vog03].

In Tabelle 5.6 werden für einen repräsentativen Untersuchungszeitraum die relativen Häufigkeiten kritischer THW-Werte in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg fahrspurselektiv gegenübergestellt. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass wenn ein Fahrzeugführer sich in einer Nachfahrsituation befindet, dann die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer kritischen Auffahrsituation (THW  $\leq 1$  s) auf der Überholspur am größten ist. Es konnte anhand der Analyse der Fahrzeugabstände und Zeitlücken verifiziert werden, dass die Hauptursache für diesen Effekt hier in der mittleren Geschwindigkeit zu finden ist. Diese ist auf der Überholspur am größten. Deshalb ist die relative Häufigkeit kritischer THW-Werte auf der Überholspur am größten. Die Häufigkeiten der kritischen THW-Werte sind für Zufahrt und Abfahrt sehr ähnlich, wenn die zugehörigen Einzelfahrzeugdaten gleichzeitig erfasst werden. Die Häufigkeiten schwanken aber zwischen den verschiedenen Werktagen. So variiert die Häufigkeit für die Überholspur beispielsweise zwischen 20,2 % und 28,0 %.

Im Vergleich zum Anteil kritischer MBV-Werte und kritischer TTC-Werte hängt der Anteil kritischer THW-Werte stark vom betrachteten Fahrerkollektiv und der Fahrzeugverteilung ab. Der gefundene Variationsumfang ist daher eine Folge des Einflusses der verschiedenen Fahrerkollektive und der zufälligen Fahrzeugverteilungen auf der Straße.

Es lässt sich für jeden Untersuchungszeitraum zeigen, dass auf der Überholspur die größten Häufigkeiten und auf der Normalspur die kleinsten Häufigkeiten kritischer THW-Werte auftreten. Eine Aussage darüber, ob die Überwachung die Häufigkeit von kritischen Auffahrsituationen reduziert oder erhöht, kann anhand der hier präsentierten Daten nicht getroffen werden, weil die THW-Werte hier nur am Überwachungsort selbst bestimmt wurden. Da die mittlere Geschwindigkeit am Überwachungsort ein lokales Minimum annimmt, ist zu vermuten, dass die Geschwindigkeitsüberwachung den Anteil kritischer

THW-Werte senkt. Im Rahmen von Sonderuntersuchungen auf der A2 wird dies für das Geschwindigkeitsüberwachungsgerät bei Braunschweig direkt überprüft werden (siehe Abschnitt 5.2.2). Für die A1 konnte diese direkte Prüfung hier nicht durchgeführt werden.

Wenn zwei Fahrzeuge eine kritische Zeitlücke zueinander einnehmen, dann stellt dies eine kritische Situation dar. Aus dieser kritischen Situation entsteht tatsächlich eine Gefahrensituation, wenn die Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs deutlich größer ist als die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs. Eine solche Gefahrensituation wird sehr gut durch die Zeit bis zur Kollision (TTC) beschrieben. Es gilt, dass TTC-Werte  $\leq 5$  s als kritisch einzustufen sind [Vog03]. Analog zur Häufigkeitsbestimmung kritischer THWs wurden für die Häufigkeitsbestimmung kritischer TTCs nur Fahrzeuge mit einer THW  $\leq 6$  s berücksichtigt. Für die Zufahrt und die Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Hamburg betrug der relative Anteil kritischer TTCs, bezogen auf die Anzahl der Fahrzeuge mit THW  $\leq 6$  s in der jeweiligen Fahrspur, maximal 0,3 %. Dieser kleine Prozentwert stellt keine Häufung kritischer TTCs dar. Die Fahrmanöver in der Zufahrt und der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver in der Zufahrt, ziehen daher keine Häufung kritischer Kollisionssituationen nach sich.

Für den Überwachungsort der Fahrtrichtung Osnabrück ergibt die Betrachtung von MBV, THW und TTC sehr ähnliche Anteile wie bei der Fahrtrichtung Hamburg. Es kann deshalb auch für den Überwachungsort der Fahrtrichtung Osnabrück geschlossen werden, dass in der Zufahrt in seltenen Fällen kritische Verzögerungsmanöver auftreten. Die Fahrmanöver in Zu- und Abfahrt insgesamt aber keine Häufung kritischer Kollisionssituationen bewirken.

### Fazit

Die Ergebnisse dieses Abschnitts zeigen, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung zwar in seltenen Fällen zu kritischen Verzögerungsmanövern führt (Forschungsfrage 3), die Fahrmanöver insgesamt, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver, aber nicht zu einer Häufung von kritischen Kollisionssituationen führen (Forschungsfrage 4).

Berücksichtigt man außerdem, dass die mittlere Geschwindigkeit am Überwachungsort kleiner ist als abseits der Überwachung und mit abnehmender mittlerer Geschwindigkeit die Verkehrssicherheit steigt, zeigen diese Ergebnisse für die A1 bei Bremen, dass die Verkehrssicherheit durch die Geschwindigkeitsüberwachung erhöht wird (Forschungsfrage 5).

Weil die hier auf der A1 betrachteten punktuellen Überwachungsgeräte in Kombination mit einer WVA betrieben werden, folgt außerdem für die Forschungsfrage 6, dass auf der A1 bei Bremen sich punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung und WVA hinsichtlich der Verkehrssicherheit begünstigen.

#### 5.1.4. Zusammenfassung (A1)

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die Forschungsfragen dieser Arbeit für die A1 bei Bremen bereits teilweise beantwortet. In diesem Abschnitt wird nun noch einmal abschließend mit Hilfe der vorgestellten Ergebnisse auf die Beantwortung der Forschungsfragen eingegangen. Es ist zu beachten, dass die Forschungsfragen auf der A1 bei Bremen immer für den speziellen Fall des kombinierten Betriebs von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA betrachtet wurden.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 1:** *Welche Fahrmanöver sind in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu beobachten und mit welchen Häufigkeiten treten die einzelnen Fahrmanöver auf?*

In der Zufahrt zu den punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten auf der A1 bei Bremen werden von den Fahrzeugführern bevorzugt Verzögerungsmanöver durchgeführt. Diese werden typischerweise bereits mehr als 80 m vor dem Überwachungsort von den Fahrzeugführern eingeleitet. Der Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt betrug bei den Verkehrsflussmessungen insgesamt ca. 80 %. Dieser Wert ist vergleichbar mit den Umfrageergebnissen. Dort betrug der Anteil der Verzögerungsmanöver zwischen ca. 50 % und ca. 80 %. Sowohl die Umfrage als auch die Verkehrsflussmessungen zeigen, dass einige Fahrzeugführer in der Zufahrt ein Verzögerungsmanöver durchführen, obwohl sie die zulässige Höchstgeschwindigkeit einhalten. In der Umfrage konnte der Anteil dieser Fahrzeugführer mit ca. 33 % abgeschätzt werden. In den Verkehrsflussmessungen hingegen war dieser Anteil mit ca. 50 % deutlich größer. Im Gegensatz zur Zufahrt treten in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver auf. Der Anteil der Fahrzeugführer, die in der Abfahrt beschleunigen, betrug bei den Verkehrsflussmessungen ca. 85 %.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 2:** *Welche Änderungen im Verkehrsfluss sind in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort ( $\pm 100$  m) feststellbar?*

Die Geschwindigkeitsreduzierungen in der Zufahrt betrugen im Mittel ca.  $\pm 0$  km/h bis  $-4$  km/h. In der Abfahrt waren entsprechend Geschwindigkeitserhöhungen von im Mittel ca.  $+1$  km/h bis  $+3$  km/h beobachtbar. Insgesamt betrugen die mittleren Geschwindigkeitsreduktionen, die auf die Geschwindigkeitsüberwachung zurückzuführen sind, ca.  $-10$  km/h für den Verkehr auf der Überholspur, ca.  $-3$  km/h bis  $-8$  km/h für den Verkehr auf der Mittelspur und ca.  $-1$  km/h bis  $-2$  km/h auf der Normalspur. Während sich die Geschwindigkeitsreduktionen auf der Normalspur an der Signifikanzgrenze bewegen, sind die Geschwindigkeitsreduktionen auf der Überholspur und der Mittelspur signifikant.

Die Messdaten ermöglichten keine fundierte Aussage über die Änderung der Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten um den Überwachungsort herum. Eine Verkehrsflussharmonisierung durch die Geschwindigkeitsüberwachung war daher anhand der Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten nicht feststellbar. Auf Grund der unterschiedlich stark

ausfallenden mittleren Geschwindigkeitsreduzierungen auf den Fahrspuren, führte die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung allerdings zu kleineren Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen benachbarten Fahrspuren (Absenkung um ca.  $-1$  km/h bis  $-6$  km/h). Der Geschwindigkeitsüberwachung wurde daher trotz der ungewissen Wirkung auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten eine verkehrsflussharmonisierende Wirkung zugesprochen.

Die mittlere Geschwindigkeit nimmt um den Überwachungsort herum ein lokales Minimum ein. Anhand des Verlaufs der mittleren Geschwindigkeit wurde der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung mit  $0,4$  km abgeschätzt. Die am Anfang dieses Abschnitts getätigte Abschätzung für den Wirkungsbereich von  $1,0$  km ist nicht so verlässlich wie der Wert von  $0,4$  km, weil am Anfang dieses Abschnitts ausschließlich die Daten der Sensoren der WVA verwendet wurden und diese eine geringere örtliche Auflösung besitzen als die Daten der Trackingradarsensoren.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 3:** *Hat die Geschwindigkeitsüberwachung kritische Verzögerungsmanöver zur Folge?*

Die Verzögerungsmanöver in der Zufahrt werden im Mittel mit moderaten Verzögerungen von  $-0,1$  m/s<sup>2</sup> bis  $-0,5$  m/s<sup>2</sup> durchgeführt. Es treten in seltenen Fällen (maximal  $0,4$  % bezogen auf die Gesamtheit aller Fahrmanöver) aber auch kritische Verzögerungsmanöver ( $MBV > 4,2$  m/s<sup>2</sup>) auf. Die Abhängigkeit der mittleren Verzögerung in der Zufahrt von der Fahrspur und dem Messort zeigt, dass Verzögerungsmanöver umso wahrscheinlicher sind, je näher die Fahrzeugführer dem Überwachungsort kommen und dass die dabei auftretenden Verzögerungen umso größer sind, je höher die jeweilige Fahrzeuggeschwindigkeit ist. In Folge dessen nimmt mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit auch die Wahrscheinlichkeit zu, dass in der Zufahrt ein kritisches Verzögerungsmanöver durchgeführt wird.

In der Abfahrt waren die mittleren Beschleunigungen betragsmäßig mit den mittleren Verzögerungen der Zufahrt vergleichbar. Kritische Verzögerungsmanöver waren in der Abfahrt nicht zu beobachten, so dass die kritischen Verzögerungsmanöver der Zufahrt tatsächlich direkt auf die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung zurückgeführt werden konnten. Die Aussagen der Umfrageteilnehmer, dass vereinzelt kritische Verzögerungsmanöver am Überwachungsort zu beobachten sind, stützen außerdem die Verkehrsflussdaten in dieser Hinsicht.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 4:** *Führen die Fahrmanöver in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu einer Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisions-situationen?*

Der relative Anteil kritischer Auffahrsituationen ( $THW \leq 1$  s) belief sich in den Zufahrten auf ähnliche Werte wie in den zugehörigen Abfahrten. Es wurde nachgewiesen,

dass die mittlere Geschwindigkeit die primäre Ursache dafür ist, dass der Anteil kritischer Auffahrsituationen von der Normalspur über die Mittelspur bis zur Überholspur hin ansteigt. Es wurde daher vermutet, dass die geschwindigkeitssenkende Wirkung der Überwachung zu einer Reduzierung der relativen Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen führt und in dieser Form die Verkehrssicherheit erhöht. Diese Vermutung konnte allerdings anhand der Messdaten nicht überprüft werden, weil hier kein Messort abseits der Überwachung zur Verfügung stand. Dies wird aber im Rahmen von Sonderuntersuchungen bei Verkehrsflussmessungen auf der A2 erfolgen (siehe Abschnitt 5.2.2).

Der relative Anteil kritischer Kollisionssituationen ( $TTC \leq 5$  s) betrug am Überwachungsort maximal 0,3 % an der Gesamtheit aller Nachfahrsituationen. Auf Grund dieses kleinen Anteils ( $< 5,0$  %) wurde hier geschlussfolgert, dass die Fahrmanöver in der Geschwindigkeitsüberwachungssituation auf der A1 bei Bremen, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver in der Zufahrt, keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge haben.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 5:** *Welche Schlussfolgerungen können anhand der Fahrmanöver und der Änderungen des Verkehrsflusses bezüglich der Verkehrssicherheit gezogen werden?*

Insgesamt kann auf Grund des lokalen Minimums der mittleren Geschwindigkeiten am Überwachungsort, der reduzierten Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren und der Feststellung, dass am Überwachungsort keine Häufung kritischer Kollisionssituationen auftritt, für die Forschungsfrage 5 gesagt werden, dass die Verkehrssicherheit durch die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung lokal erhöht wird.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 6:** *Heben sich die positiven Wirkungen, die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung und WVA jeweils auf die Verkehrssicherheit haben, bei der Kombination beider Systeme auf, oder unterstützen sich beide Systeme hinsichtlich der Verkehrssicherheit?*

Die punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A1 bei Bremen senken die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses lokal ab und erhöhen somit den Befolgungsgrad für die von der WVA angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit. In Verbindung mit Forschungsfrage 5 heißt das, dass die punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte die verkehrssichernde Wirkung der WVA unterstützen.

### Weitere Erkenntnisse

Die gefundenen Antworten bezüglich der gestellten Forschungsfragen, waren hier auf der A1 bei Bremen unabhängig vom Werktag und der Fahrtrichtung bzw. dem Überwachungsort. Die Abhängigkeit dieser Antworten von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit konnte hier auf der A1 nicht untersucht werden, weil der freie Verkehrsfluss nur für die

zulässige Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auftrat. Für eine belastbare Antwort auf die Forschungsfrage 7 genügen diese Ergebnisse noch nicht. Dafür müssen zunächst die Verkehrsflussmessungen ausgewertet werden, die auf der A2 durchgeführt wurden.

Die in diesem Abschnitt gegebenen Antworten auf die Forschungsfragen stehen in guter Übereinstimmung mit der Erkenntnis aus der Literatur, wonach mittels punktueller Geschwindigkeitsüberwachung die Unfallrate gesenkt wird (siehe Abschnitt 2.4.2). Für das gefundene Verhalten um den Überwachungsort herum wurden in der Literatur teilweise die Begriffe „Kängurueffekt“ und „Akkordeoneffekt“ geprägt.

### 5.2. Verkehrsflussmessungen auf der A2 bei Braunschweig

In diesem Abschnitt wird die Auswertung der Verkehrsflussmessungen von der A2 erfolgen. Die Verkehrsflussdaten werden dazu dienen, die im Folgenden genannten Forschungsfragen im Bezug auf die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung, welche in Kombination mit einer WVA betrieben wird, zu erörtern.

Für einen ersten Überblick wird zu Beginn dieses Abschnitts der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts untersucht. Danach folgt die Untersuchung der Fahrmanöver und des Verkehrsflusses in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort. Diese Untersuchungen werden Antworten zu den Forschungsfragen 1 und 2 des Themenschwerpunkts I für die A2 bei Braunschweig liefern, welche die Betrachtung der Fahrmanöver und des Verkehrsflusses adressieren. Für die Beantwortung der Forschungsfragen 3 bis 5 (Betrachtung der Verkehrssicherheit) des Themenschwerpunkts I werden anschließend die SSM für die A2 bei Braunschweig bestimmt. Die Forschungsfragen 6 und 7, welche die kombinierte Wirkung von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA auf die Verkehrssicherheit betrachten (Themenschwerpunkt II), werden ebenfalls in diesem Abschnitt diskutiert werden – zusammen mit den Erkenntnissen, die bereits auf der A1 bei Bremen gewonnen werden konnten.

#### 5.2.1. Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A2)

Auf der A2 bei Braunschweig befindet sich ein punktuell arbeitendes Geschwindigkeitsüberwachungsgerät. Dieses überwacht den Verkehr der Fahrtrichtung Berlin. Die für die Fahrzeugführer sichtbaren Komponenten des Überwachungsgerätes befinden sich in Fahrtrichtung gesehen ca. 35 m vor einem Anzeigequerschnitt der WVA. Der Überwachungsort selbst – der Ort an dem das Überwachungsgerät die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge misst – liegt in einer Entfernung von ca. 55 m zum Anzeigequerschnitt.

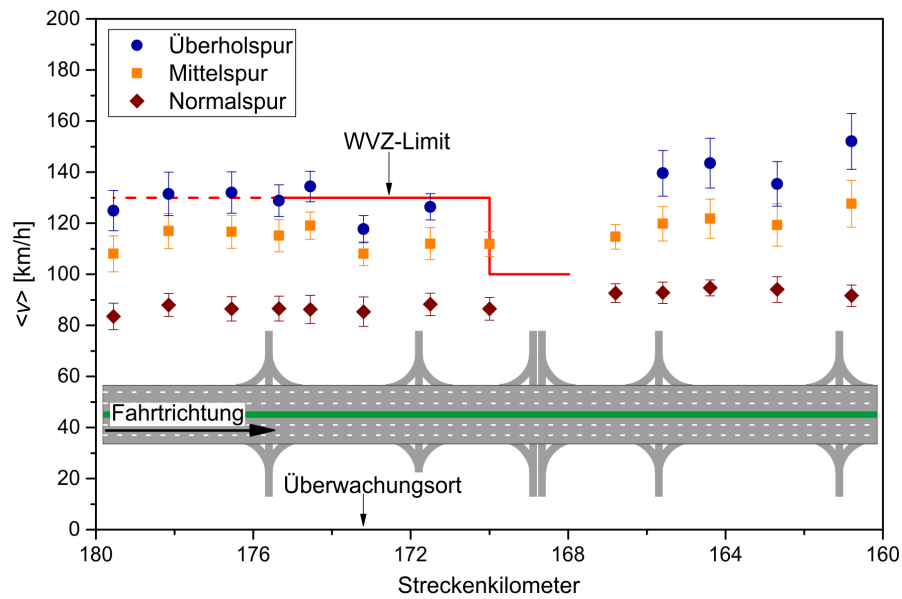
Wie auf der A1 so wurde auch auf der A2 zuerst das Geschwindigkeitsprofil des gesamten Streckenabschnitts mit Hilfe der Verkehrsflussdaten der WVA-Sensoren untersucht. Für diese Untersuchung wurden die Messdaten für insgesamt 10 Werktage von der VRZ abgerufen. Die Messdaten lagen in Form von Minutenmittelwerten vor. Die Minutenmit-

telwerte eines Werktags wurden immer für speziell ausgewählte Untersuchungszeiträume ausgewertet. Als Untersuchungszeiträume kamen nur Zeitintervalle in Betracht, in denen sich der Verkehr am Überwachungsort im stabilen und freien Verkehrszustand befand. Dieser Verkehrszustand äußerte sich in den Messdaten der A2 anhand einer mittleren Geschwindigkeit von mehr als 100 km/h auf der Überholspur am Überwachungsort und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von mindestens 100 km/h. Beide Grenzwerte wurden wie auf der A1 empirisch bestimmt. Als weitere Randbedingung wurde bei der Auswahl der Untersuchungszeiträume darauf geachtet, dass sich die von einem jeden Anzeigequerschnitt jeweils dargestellte zulässige Höchstgeschwindigkeit innerhalb des Untersuchungszeitraums nicht änderte. Da auf dem betrachteten Streckenabschnitt viele Anzeigequerschnitte tagsüber nahezu stündlich ihre angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit ändern, konnte diese Randbedingung nicht in jedem Untersuchungszeitraum für alle Anzeigequerschnitte erfüllt werden. Es wurde in einem solchen Fall dann aber darauf geachtet, dass sich während des Untersuchungszeitraums um den Überwachungsort herum keine Änderungen in der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ergaben. Die Untersuchungszeiträume erstreckten sich je nach Werktag über 1,8 bis 5,5 Stunden. Das heißt, ein Untersuchungszeitraum umfasste zwischen 110 und 330 Minutenmittelwerte.

Für die Erstellung eines Geschwindigkeitsprofils wurden die in Form von Minutenmittelwerten vorliegenden Geschwindigkeitswerte eines Untersuchungszeitraums gemittelt. Die Mittelwertbildung erfolgte für jeden Messquerschnitt separat und immer fahrspurelektiv. Die sich aus dieser Mittelwertbildung ergebenden Geschwindigkeitsmittelwerte und Standardabweichungen wurden verwendet, um das Geschwindigkeitsprofil der A2 im untersuchten Streckenabschnitt zu beschreiben. Die Geschwindigkeitsprofile ließen sich über mehrere Monate hinweg sehr gut reproduzieren, vorausgesetzt die Schaltzustände der WVA waren identisch.

In Abbildung 5.11 wird das Geschwindigkeitsprofil der A2 bei Braunschweig für einen repräsentativen Untersuchungszeitraum dargestellt, in dem am Überwachungsort die zulässige Höchstgeschwindigkeit 130 km/h betrug. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich über 190 Minuten. Pro Fahrspur passierten 2500 bis 3500 Fahrzeuge den Streckenabschnitt während dieses Zeitraums. In Abbildung 5.11 ist neben den Messdaten ein Schema des Streckenabschnitts enthalten. Im Anhang E finden sich nähere Erläuterungen dazu.

Die von der WVA angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit (WVZ-Limit) ist in Abbildung 5.11 in Form einer roten Linie eingetragen worden. Die am Beginn des Streckenabschnitts befindlichen Anzeigequerschnitte zeigten nicht über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h an, sondern waren zeitweise auch deaktiviert. In diesem Bereich des Streckenabschnitts wird deshalb das WVZ-Limit von einer gestrichelten roten Linie repräsentiert. Am Überwachungsort galt durchgängig die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. Im weiteren Verlauf des Streckenabschnitts wurde ab Streckenkilometer 170 die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h auf 100 km/h gesenkt. Grund für diese Reduktion ist das Vorliegen



**Abbildung 5.11.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der A2 bei Braunschweig in der Fahrtrichtung Berlin für den Fall einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h am Überwachungsort. Die Geschwindigkeitsüberwachung findet bei Streckenkilometer 173,2 statt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Minutenmittelwerten der Sensoren der WVA. Die gestrichelte rote Linie markiert den Bereich in dem die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h nur zeitweise galt.

eines Autobahnkreuzes zwischen den Streckenkilometern 170 und 168. In Fahrtrichtung hinter diesem Autobahnkreuz wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h aufgehoben. Die nachfolgenden Anzeigequerschnitte waren alle deaktiviert.

Der Abbildung 5.11 ist zu entnehmen, dass jede Fahrspur ein ihr typisches Geschwindigkeitsprofil aufweist. Mit Hilfe von Differenztests wurde verifiziert (siehe Anhang C), dass bei den im Geschwindigkeitsprofil der A2 vorliegenden Messwerten Geschwindigkeitsunterschiede größer 2,8 km/h als signifikant zu bezeichnen sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %).

Der Verkehr auf der Normalspur besaß mit 60 % bis 80 % den größten LKW-Anteil der 3 Fahrspuren. Das Geschwindigkeitsprofil der Normalspur zeigt deshalb die niedrigsten mittleren Geschwindigkeiten. Es liegt überall dort wo ein Limit galt deutlich unterhalb des jeweils angezeigten WVZ-Limits. Der Wert der mittleren Geschwindigkeit schwankt für die Normalspur zwischen 83 km/h und 93 km/h.

Auf der Mittelspur zählten nur 5 % bis 15 % der Fahrzeuge zur Kategorie LKW. Mit 107 km/h bis 127 km/h nehmen die mittleren Geschwindigkeiten auf der Mittelspur



deshalb signifikant größere Werte an als auf der Normalspur. Ein Überschreiten der zulässigen Höchstgeschwindigkeit kann aber auch im Profil der Mittelspur nicht festgestellt werden.

Die größten mittleren Geschwindigkeiten sind im Geschwindigkeitsprofil der Überholspur zu finden. Der Verkehr auf der Überholspur bestand ausschließlich aus PKWs. Die mittleren Geschwindigkeiten auf der Überholspur variieren zwischen 117 km/h und 152 km/h. Für die Überholspur zeigen sich am Beginn des Streckenabschnitts mittlere Geschwindigkeiten, die oberhalb der zeitweise angezeigten Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h liegen. Auf Grund der zeitlich begrenzten Gültigkeit der Höchstgeschwindigkeit in diesem Bereich, muss dies noch keinen niedrigen Befolgungsgrad implizieren. Bei Streckenkilometer 174,6 galt die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h während des gesamten Untersuchungszeitraums. Dort liegt die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur deutlich oberhalb des Limits. Dies weist auf einen niedrigen Befolgungsgrad hin. Bei Streckenkilometer 173,2 erreicht die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur schließlich ihr Minimum ehe sie für den restlichen Teil des Streckenabschnitts wieder eine ansteigende Tendenz zeigt. Für die Überholspur gibt es nicht zu jedem Messquerschnitt einen Messwert, da an zwei Messquerschnitten in der Mitte des Streckenabschnitts die WVA-Sensoren defekt waren.

Der Messquerschnitt, an dem das Minimum der mittleren Geschwindigkeit der Überholspur auftritt, zeichnet sich gegenüber den benachbarten Messquerschnitten durch das Vorhandensein eines stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes aus. Es kann daher für diesen Streckenabschnitt der A2 dieselbe Schlussfolgerung wie für den Streckenabschnitt der A1 gezogen werden. Die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung reduziert die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses und führt somit zu einem erhöhten Befolgungsgrad für das von der WVA angezeigte Limit. Vergleicht man die mittleren Geschwindigkeiten bei Streckenkilometer 173,2 mit denen bei Streckenkilometer 174,6 für verschiedene Werktage an denen beim Überwachungsort die zulässige Höchstgeschwindigkeit 130 km/h betrug, so kann für die Überholspur die Geschwindigkeitsreduktion im Mittel mit  $-16,7$  km/h bestimmt werden. Für die Mittelspur beträgt die Absenkung der Geschwindigkeit im Mittel  $-10,5$  km/h und für die Normalspur  $-2,3$  km/h (siehe Tabelle 5.7). Die Geschwindigkeitsreduzierungen für Mittel- und Überholspur sind signifikant (Signifikanzgrenze =  $2,8$  km/h). Die Werte liegen etwas oberhalb der in der Literatur typischerweise angegebenen Werte (siehe Abschnitt 2.4.2). Die Geschwindigkeitsmittelwerte bei Streckenkilometer 171,5 wurden für die Berechnung der Reduzierung hier nicht berücksichtigt, da diese Werte durch eine Autobahnanschlussstelle und das bevorstehende Autobahnkreuz beeinflusst werden.

Dadurch, dass der Betrag der Geschwindigkeitsreduzierung der punktuellen Überwachung fahrspurabhängig ist, bewirkt die Geschwindigkeitsüberwachung auf der A2 eine Reduktion der Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren. Dieser Einfluss ist auch bereits von der A1 bekannt. Bei einem Limit von 130 km/h am Überwachungsort beträgt

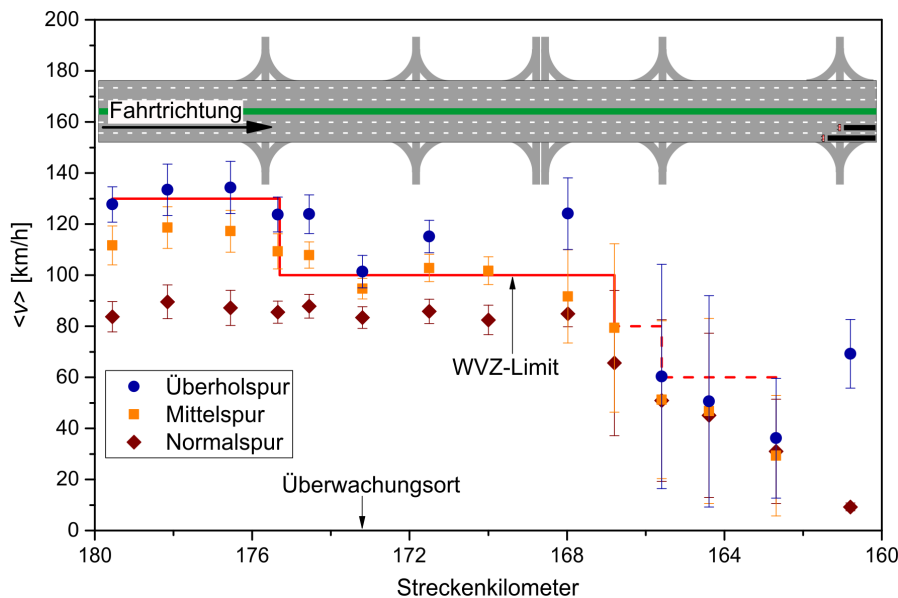
Limit	100 km/h	130 km/h	deaktiviert
Normalspur	−4,8	−2,3	−3,0
Mittelspur	−12,9	−10,5	−11,1
Überholspur	−21,5	−16,7	−19,4

**Tabelle 5.7.:** Mittlere Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit vom angezeigten Limit die von der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung bei Streckenkilometer 173,2 im Vergleich zu Streckenkilometer 174,6 hervorgerufen wird. Die Messwerte basieren auf den Minutenmittelwerten der Sensoren der WVA. Geschwindigkeitsänderungen betragsmäßig größer 2,8 km/h gelten hier als signifikant.

die Reduktion der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Überholspur und Mittelspur im Mittel −6,2 km/h und zwischen Mittelspur und Normalspur −8,2 km/h. Ein Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten konnte hier nicht festgestellt werden, weil sich die Standardabweichungen der Geschwindigkeitsmittelwerte nicht gut genug reproduzieren ließen. Grund hierfür war wie auf der A1 der große Einfluss des Fahrerkollektivs auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten.

Da auf der A2 der stabile und freie Verkehrsfluss am Überwachungsort für alle zulässigen Höchstgeschwindigkeiten größer gleich 100 km/h auftrat und die WVA auf der A2 auch deaktiviert sein konnte, war es möglich den Einfluss der Überwachung in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit zu untersuchen. Neben der Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h, die bereits diskutiert wurde, konnte der Einfluss für den Fall einer Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h und für den Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit (WVA deaktiviert) untersucht werden.

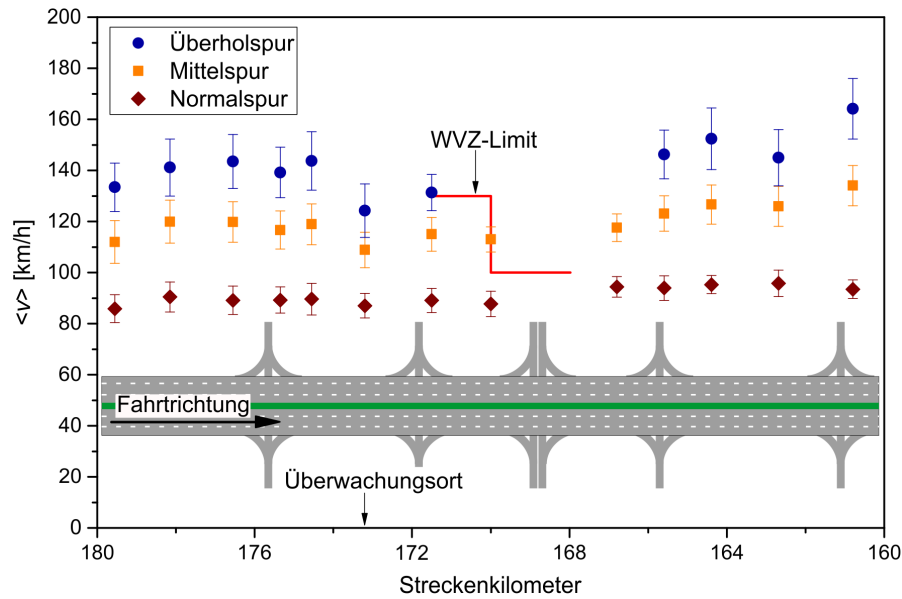
In Tabelle 5.7 sind die mittleren Geschwindigkeitsänderungen für alle drei Fälle zusammengefasst worden. Es zeigt sich, dass in allen drei Fällen durch die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses reduziert wird. Der Betrag dieser Geschwindigkeitsreduktion ist abhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Er steigt in jedem Fall von der Normalspur über die Mittelspur bis zur Überholspur hin an. Diese Fahrspurabhängigkeit der Geschwindigkeitsreduktion führt zu einer Absenkung der Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren. Diese Absenkung ist relativ unabhängig vom angezeigten Limit und beträgt zwischen −6,2 km/h und −8,6 km/h. Bei der Betrachtung der Werte in Tabelle 5.7 wird weiterhin ersichtlich, dass bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h die geschwindigkeitsreduzierende Wirkung der punktuellen Überwachung am geringsten ist. Im Falle der Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h nehmen die Geschwindigkeitsreduktionen die betragsmäßig größten Werte an. Es ist bemerkenswert, dass bei einer deaktivierten WVA die Geschwindigkeitsüberwachung zu einer größeren Geschwindigkeitsreduktion führt als bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h.



**Abbildung 5.12.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der A2 bei Braunschweig in der Fahrtrichtung Berlin für den Fall einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h am Überwachungsort. Die Geschwindigkeitsüberwachung findet bei Streckenkilometer 173,2 statt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Minutenmittelwerten der Sensoren der WVA. Die gestrichelte rote Linie markiert den Bereich in dem die zulässige Höchstgeschwindigkeit nur zeitweise galt.

Zur Vervollständigung dieses Abschnitts werden in den Abbildung 5.12 und 5.13 zwei weitere Geschwindigkeitsprofile der A2 bei Braunschweig dargestellt. Die Abbildung 5.12 stellt einen Fall dar, indem eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h am Überwachungsort gilt. Der Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit am Überwachungsort wird hingegen in Abbildung 5.13 dargestellt. Die Mittelwerte beider Abbildungen beruhen auf den Geschwindigkeiten von 2000 bis 3000 Fahrzeugen pro Fahrspur in Form von 160 bzw. 180 Minutenmittelwerten.

Die in Abbildung 5.12 dargestellten Geschwindigkeitsprofile der 3 Fahrspuren unterscheiden sich am Beginn des Streckenabschnitts signifikant. Im zweiten Teil des Streckenabschnitts nähern sich die mittleren Geschwindigkeiten der Fahrspuren einander an, sodass kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den Fahrspuren besteht. Ab Streckenkilometer 168 beginnt die zulässige Höchstgeschwindigkeit in Fahrtrichtung stetig abzunehmen. Es handelt sich hier um einen sogenannten Geschwindigkeitstrichter, der einer Baustelle vorgelagert ist, die bei Streckenkilometer 162 beginnt. Im Bereich dieses Baustellentrichters trat während des Untersuchungszeitraums teilweise Stau auf. Bei Stau stellen die Anzeigequerschnitte keine zulässige Höchstgeschwindigkeit dar, weshalb die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Bereich des Trichters nur zeitweise aktiv war. Die mittlere



**Abbildung 5.13.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der A2 bei Braunschweig in der Fahrtrichtung Berlin für den Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit am Überwachungsort. Die Geschwindigkeitsüberwachung findet bei Streckenkilometer 173,2 statt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Minutenmittelwerten der Sensoren der WVA.

Geschwindigkeit der Überholspur liegt am Beginn des Streckenabschnitts teilweise über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. Diese Tatsache zeugt von einer Reihe an Geschwindigkeitsübertretungen. Im weiteren Verlauf des Streckenabschnitts sinkt die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h ab. Die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur geht aber zunächst nur auf etwa 125 km/h zurück. Die Differenz zwischen mittlerer Geschwindigkeit und zulässiger Höchstgeschwindigkeit ist dort deshalb sogar größer als die zugehörige Standardabweichung. Erst am Überwachungsort erreicht die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Der Einfluss der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung bei Streckenkilometer 173,2 wird damit deutlich. Es wird außerdem ersichtlich, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h keine Akzeptanz unter den Fahrzeugführern der Überholspur findet, sofern keine Überwachung erfolgt und ein freier Verkehrszustand vorliegt. Teilweise zeigt auch der Verkehrsfluss der Mittelspur mittlere Geschwindigkeiten oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Im Bereich des Baustellentrichters liegen die Geschwindigkeitsmittelwerte aller Fahrspuren unterhalb des zeitweise gültigen Limits.

Bei dem in Abbildung 5.13 dargestellten Fall zeigen die Anzeigequerschnitte der WVA nur im Bereich des Autobahnkreuzes und in einem kurzen Zulauf zu diesem Autobahnkreuz eine zulässige Höchstgeschwindigkeit an. Diese beträgt zunächst 130 km/h und wird anschließend auf 100 km/h gesenkt. Auch in diesem Fall unterscheiden sich die mittleren

Geschwindigkeiten der Fahrspuren signifikant. Auf der Überholspur treten teilweise sehr hohe mittlere Geschwindigkeiten größer 130 km/h auf. Die kleinsten Werte der mittleren Geschwindigkeiten von Überholspur und Mittelspur finden sich am Überwachungsort. Die Wirkung des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes ist damit selbst ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit sichtbar.

### Fazit

Für das auf der A2 befindliche punktuell arbeitende Geschwindigkeitsüberwachungsgerät können anhand der Daten der WVA-Sensoren insgesamt dieselben Wirkungen auf den Verkehrsfluss nachgewiesen werden wie für die beiden Überwachungsgeräte auf der A1 (Reduktion der mittleren Geschwindigkeiten und Reduktion der mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren). In den Werten der Geschwindigkeitsreduktionen unterscheiden sich beide Streckenabschnitte allerdings. Tendenziell sind die mittleren Geschwindigkeitsreduktionen im Überwachungsfall auf der A2 betragsmäßig etwas größer als die entsprechenden Werte auf der A1. Auf der A2 wurde zusätzlich der Nachweis erbracht, dass die Reduktion der mittleren Geschwindigkeit und die Reduktion der mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängen. So konnte bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h eine betragsmäßig kleinere Reduktion festgestellt werden als bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeiten schlechter befolgt werden als höhere. Sofern ein stabiler und freier Verkehrsfluss vorliegt, treten die genannten Wirkungen auf der A2 auch in Fällen ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit (WVA deaktiviert) auf.

Eine Abschätzung des Wirkungsbereichs erfolgte in diesem Abschnitt nicht, weil dafür die Verkehrsflussdaten der Trackingradarsensoren auf Grund ihrer hohen örtlichen Auflösung besser geeignet sind. Diese Daten werden in den folgenden beiden Abschnitten ausgewertet und diskutiert (siehe Abschnitt 5.2.2 und 5.2.3). Diese Auswertung wird dann auch Antworten auf die Forschungsfragen 1 bis 6 bzw. in Kombination mit den Erkenntnissen von der A1 auch zur Forschungsfrage 7 geben.

### Anmerkung

In Abbildung 5.12 besteht die Besonderheit, dass der Anzeigequerschnitt kurz hinter dem Überwachungsort während des Untersuchungszeitraums defekt war. Dieser war deshalb deaktiviert und mit dem Hinweis „Außer Betrieb“ versehen. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit wurde durch diesen Anzeigequerschnitt somit nicht verändert. Die PTB-A 12.01 sehen für diesen Fall vor, dass das Überwachungsgerät nicht das Limit der WVA überwacht. Der Großteil der Fahrer ist trotzdem von einer realen Überwachungssituation ausgegangen, da die PTB-A 12.01 eine technische Richtlinie darstellen, die sich nur an Fachexperten richtet und somit den meisten Fahrern nicht bekannt ist.

### 5.2.2. Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A2)

Die Geschwindigkeitsprofile der A2 bei Braunschweig deuten darauf hin, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung unabhängig vom zulässigen Limit zu Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern führt. Es können aber anhand der Geschwindigkeitsprofile keine Aussagen zu den einzelnen Fahrmanövern getroffen werden. In diesem Abschnitt werden deshalb die Fahrmanöver am Überwachungsort detailliert betrachtet. Mit Hilfe dieser Untersuchungen werden anschließend die Forschungsfragen 1 und 2 für die A2 bei Braunschweig beantwortet (Betrachtung der Fahrmanöver und des Verkehrsflusses). In diesem Abschnitt wird außerdem eine Abschätzung des Wirkungsbereichs der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung erfolgen.

#### Zufahrt und Abfahrt

Für die Analyse der Fahrmanöver wurden die Trackingradarsensoren auf dem in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsortes befindlichen Anzeigequerschnitt in Betrieb genommen. Der Überwachungsort befand sich bezogen auf diesen Anzeigequerschnitt etwa in einer Entfernung von 55 m. In Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit wurden die Fahrmanöver in der Zufahrt und der Abfahrt analysiert. Es zeigte sich, dass von den Fahrzeugführern in der Zufahrt bevorzugt Verzögerungsmanöver und in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver durchgeführt werden. In der Tabelle 5.8 sind die daraus resultierenden mittleren Geschwindigkeitsänderungen der Zufahrt und der Abfahrt für die unterschiedlichen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten gegenübergestellt worden. In der Zufahrt wurde für jede Fahrspur der mittlere Geschwindigkeitswert bei 20 m Entfernung mit dem zugehörigen mittleren Geschwindigkeitswert bei 100 m verglichen. In der Abfahrt wurde in ähnlicher Weise verfahren. In der Abfahrt kamen allerdings die Geschwindigkeitsmittelwerte bei den Entfernungen von –100 m und –40 m zum Einsatz. Analog zum Abschnitt 5.1.2 wurden hier der Abfahrt negative Entfernungswerte zugeordnet.

Mit Hilfe von Differenztests wurde verifiziert, dass bei den Geschwindigkeitsmittelwerten der Trackingradarsensoren hier auf der A2 Differenzen größer 1,4 km/h als signifikant zu bewerten sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %).

Der Tabelle 5.8 ist zu entnehmen, dass in der Zufahrt die mittleren Geschwindigkeitsänderungen der Normalspur in keinem der untersuchten Fälle signifikante Werte annehmen. Für Mittelspur und Überholspur sind hingegen in jedem Fall signifikante Geschwindigkeitsreduktionen in der Zufahrt zu verzeichnen. Die Geschwindigkeitsreduktionen auf der Überholspur sind betragsmäßig größer als die Geschwindigkeitsreduktionen auf der Mittelspur. Sowohl für die Mittelspur als auch für die Überholspur gilt, dass die Geschwindigkeitsreduktion bei einem Limit von 100 km/h am größten ausfällt und bei einem Limit von 130 km/h am kleinsten. Für den Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit liegen die Geschwindigkeitsreduktionen jeweils zwischen diesen Werten. Dieser gefundene Effekt ist nicht überraschend. Denn je niedriger die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist, umso

Limit	Normalspur			Mittelspur			Überholspur		
	$\Delta v_{zu}$	$\Delta v_{ab}$	$\langle v \rangle$	$\Delta v_{zu}$	$\Delta v_{ab}$	$\langle v \rangle$	$\Delta v_{zu}$	$\Delta v_{ab}$	$\langle v \rangle$
100	-0,5	+3,0	82,1	-2,7	+2,5	94,2	-4,7	+3,8	100,6
130	$\pm 0,0$	+3,4	84,4	-2,0	+1,3	108,5	-2,6	+2,8	117,8
deakt.	$\pm 0,0$	+3,4	86,5	-2,3	+1,2	107,9	-3,4	+2,3	122,6

**Tabelle 5.8.:** Mittlere Geschwindigkeitsänderungen für Zufahrt (zu) und Abfahrt (ab) und mittlere Geschwindigkeiten in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsortes in Abhängigkeit von Limit und Fahrspur (alle Werte in km/h). Für die Zufahrt (Abfahrt) wurden die Geschwindigkeiten bei 20 m (-100 m) und 100 m (-40 m) Entfernung miteinander verglichen. Die Entfernungswerte beziehen sich auf die Trackingradarsensoren. Die Daten basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Geschwindigkeitsänderungen betragsmäßig größer 1,4 km/h gelten hier als signifikant.

weniger findet diese unter den Fahrzeugführern Akzeptanz und umso deutlicher wird diese übertreten – solange sich der Verkehr im freien und stabilen Zustand befindet. Im Überwachungsfall führt der Überwachungsdruck dazu, dass die Fahrzeugführer bestrebt sind die zulässige Höchstgeschwindigkeit zu befolgen. Je nach Ausmaß der vorherigen Übertretung müssen die Fahrzeugführer im Überwachungsfall daher mehr oder weniger verzögern.

Die Messdaten der Trackingradarsensoren stützen damit die im Abschnitt 5.2.1 gemachte Schlussfolgerung, dass die geschwindigkeitssenkende Wirkung der punktuellen Überwachung auf der A2 bei Braunschweig im Fall einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h stärker ist als im Fall einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h, sofern ein freier Verkehrszustand vorliegt. Es zeigt sich außerdem analog zum Abschnitt 5.2.1, dass die geschwindigkeitssenkende Wirkung der Überwachung für den Fall ohne geltendes Limit stärker ist als bei einem Limit von 130 km/h.

In der Abfahrt zeigt die Normalspur unabhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit eine signifikante Geschwindigkeitserhöhung (Signifikanzgrenze = 1,4 km/h). Die Geschwindigkeitserhöhungen auf den Abfahrten der anderen beiden Fahrspuren sind fast alle kleiner als die entsprechenden Werte auf der Normalspur. Nur für den Fall der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h ist die Geschwindigkeitserhöhung auf der Überholspur größer als auf der Normalspur. Auf der Mittelspur sind die Geschwindigkeitserhöhungen in der Abfahrt teilweise nicht signifikant.

Der Vergleich der Geschwindigkeitsreduzierungen, die in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort bestimmt werden konnten (siehe Tabelle 5.8), mit den Geschwindigkeitsreduzierungen, die anhand der benachbarten Messquerschnitte bestimmt wurden (siehe Tabelle 5.7), zeigt, dass die Fahrzeugführer bereits mehr als 50 m (100 m – 50 m) vor dem Überwachungsort beginnen ihre Geschwindigkeit an die Überwachungssituation

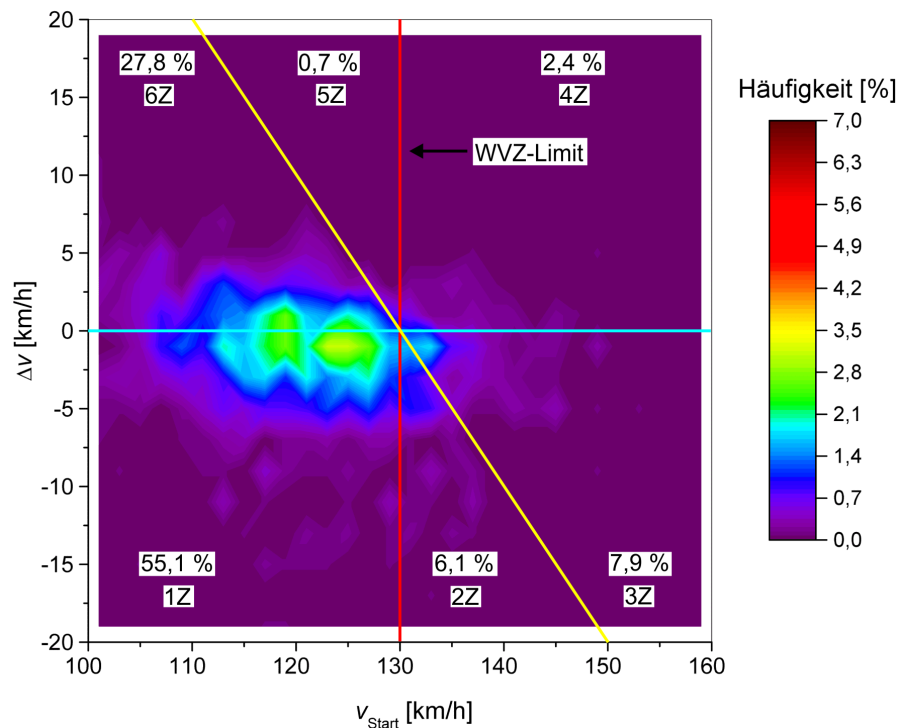
anzupassen. Die Geschwindigkeitsänderungen in der Zu- und Abfahrt auf der A2 bei Braunschweig sind insgesamt vergleichbar mit denen auf der A1 bei Bremen (vergleiche Tabelle 5.8 mit Tabelle 5.5).

Bei der Betrachtung der Werte in Tabelle 5.8 muss berücksichtigt werden, dass sich die Geschwindigkeitsreduzierungen der Zufahrt auf eine Wegstrecke von 80 m beziehen und die Geschwindigkeitserhöhungen der Abfahrt auf eine Wegstrecke von 60 m. Wenn man dies beachtet, kann für Mittelspur und Überholspur die Aussage getroffen werden, dass der Geschwindigkeitsabfall je Weeinheit in der Zufahrt betragsmäßig sehr ähnlich ist zum zugehörigen Geschwindigkeitsanstieg je Weeinheit in der Abfahrt. Es lässt sich daher schließen, dass die mittleren Verzögerungen in der Zufahrt vergleichbar sind mit den mittleren Beschleunigungen in der Abfahrt. Die Untersuchung der Verzögerungen und Beschleunigungen in Zu- und Abfahrt ergab tatsächlich, dass die mittleren Verzögerungswerte und die mittleren Beschleunigungswerte einen miteinander vergleichbaren Betrag von etwa  $0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $0,5 \text{ m/s}^2$  besitzen. Damit sind die mittleren Verzögerungen und Beschleunigungen am Überwachungsort der A2 identisch zu den Werten, die an den Überwachungsstellen der A1 gefunden wurden.

Der Wirkungsbereich des punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes auf der A2 bei Braunschweig kann mit Hilfe der mittleren Geschwindigkeiten an den benachbarten Messquerschnitten und den Geschwindigkeitsänderungen auf der Überholspur in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsortes abgeschätzt werden (analog zu Abschnitt 5.1.2). Bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h beträgt der Wirkungsbereich schätzungsweise  $2 \times 500 \text{ m} = 1,0 \text{ km}$ . Falls keine zulässige Höchstgeschwindigkeit gilt, kann der Wirkungsbereich ebenfalls mit 1,0 km abgeschätzt werden. Für den Fall einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h beläuft sich diese Abschätzung auf  $2 \times 350 \text{ m} = 0,7 \text{ km}$ . Das heißt, für eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h führt die punktuelle Überwachung zwar zu größeren Geschwindigkeitsreduktionen als bei den anderen beiden Fällen, der abgeschätzte Wirkungsbereich ist dann aber deutlich kleiner.

In der Tabelle 5.8 werden auch die mittleren Geschwindigkeiten der 3 Fahrspuren in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsortes in Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit aufgelistet. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Für die Mittelwertbildung wurden hier nur Geschwindigkeiten verwendet, die in einer Entfernung von 20 m zu den Trackingradarsensoren bestimmt wurden. Die Werte zeigen für alle Fahrspuren einen signifikanten Anstieg mit zunehmender zulässiger Höchstgeschwindigkeit. Wenn keine zulässige Höchstgeschwindigkeit gilt, sind die mittleren Geschwindigkeiten am größten. Für die Überholspur ist bemerkenswert, dass bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h die Überwachung nicht dazu führt, dass die mittlere Geschwindigkeit kleiner als die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist.





**Abbildung 5.14.:** Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der einzelnen Fahrzeuge der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes. Die Geschwindigkeitsänderung basiert für jedes Fahrzeug auf der Differenz zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten am Anfang und Ende der Zufahrt, die mit Hilfe eines Trackingradarsensors erfasst wurden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit betrug 130 km/h.

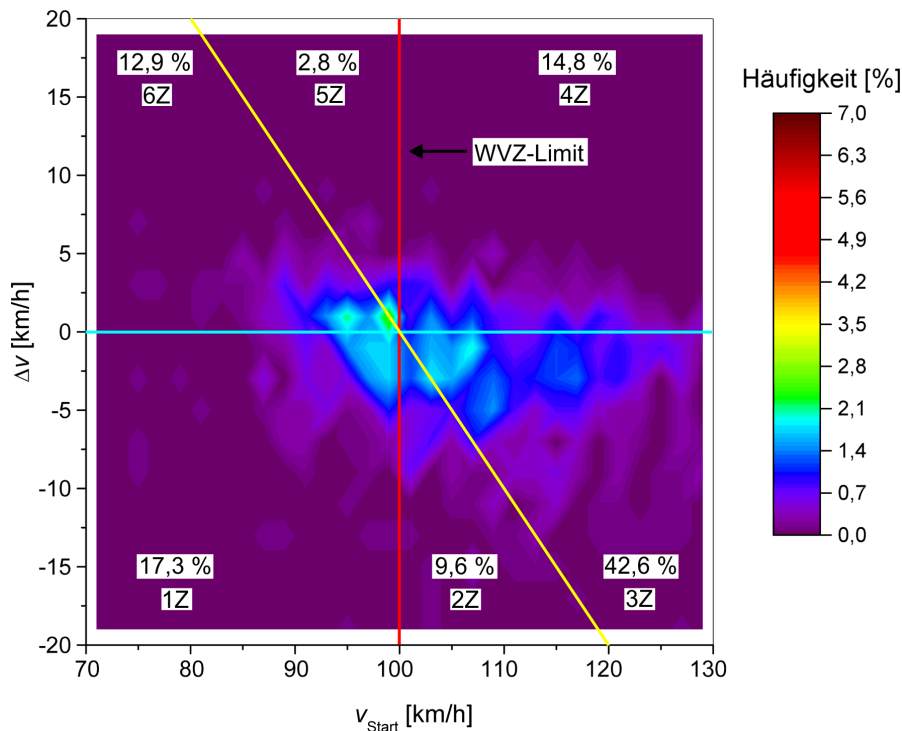
Wie auf der A1 so war auch hier auf der A2 die Analyse der Fahrmanöver in Zu- und Abfahrt anhand der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der einzelnen Fahrzeuge möglich. In Abbildung 5.14 ist die Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen zu sehen, die die Fahrzeuge in der Zufahrt der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit erfahren haben. Die zugehörigen Einzelfahrzeugdaten wurden im selben Untersuchungszeitraum aufgezeichnet wie die in Abbildung 5.11 dargestellten Messwerte der WVA-Sensoren. Das heißt, am Überwachungsort galt hier eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. Die Fahrmanöver können wieder in die für die Zufahrt bekannten 6 Klassen eingeteilt werden (siehe Tabelle 5.1), wobei die 80 m in Tabelle 5.1 hier ca. 50 m entsprechen, weil hier der Überwachungsort weiter vom Anzeigequerschnitt entfernt ist als auf der A1.

Analog zu den Untersuchungen auf der A1 wurden hier für die Bestimmung der Häufigkeitsverteilung der Fahrmanöver nur Fahrzeuge berücksichtigt, die bei Entfernungen größer 98 m erstmals vom Trackingradar detektiert wurden und bis zu Entfernungen

kleiner 32 m verfolgt werden konnten. Der dargestellten Häufigkeitsverteilung liegen die Geschwindigkeitsänderungen von ca. 1200 Fahrzeugen zu Grunde. Im Folgenden Absatz soll die Häufigkeitsverteilung der A1 (Abbildung 5.5) mit der Häufigkeitsverteilung der A2 (Abbildung 5.14) verglichen werden. Es ist zu beachten, dass im hier dargestellten Fall am Überwachungsort der A2 eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h galt und auf der A1 immer eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h betrachtet wurde.

Der Vergleich beider Häufigkeitsverteilungen zeigt, dass die Verteilung auf der A2 deutlich breiter ist als auf der A1. Die breitere Verteilung führt zu einem kleineren Maximalwert der Häufigkeit. Das Maximum der Verteilung erreicht hier auf der A2 deshalb nur ca. 4 % während auf der A1 ca. 7 % erreicht wurden. Die relativen Häufigkeiten der Klassen 4Z und 5Z sind für den hier dargestellten Fall der A2 vergleichbar mit den Werten von der A1. Für die Häufigkeiten der anderen Klassen gilt dies nicht. So beträgt beispielsweise der Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt, die auf Grund der Fahrzeuggeschwindigkeit unnötig gewesen sind (1Z), auf der A2 (55,1 %) signifikant mehr als auf der A1 (47,2 %). Es zeigt sich außerdem, dass auf der A2 signifikant häufiger die Fahrzeugführer in der Zufahrt ihre Geschwindigkeit zulässigerweise erhöhen (6Z). Andererseits lässt sich feststellen, dass der Anteil der Übertreter, die in der Zufahrt bremsen (2Z + 3Z), hier auf der A2 mit 14,0 % signifikant kleiner ausfällt als auf der A1 (33,1 %). Als Hauptursachen für diese Unterschiede sind die unterschiedlichen Befolgungsgrade und Häufigkeiten der Verzögerungsmanöver zu nennen. Während auf der A1 am Anfang der Zufahrt 62,1 % der Fahrzeugführer die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h befolgen, beträgt der Befolgungsgrad auf der A2 bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h am Anfang der Zufahrt 83,6 % (1Z + 5Z + 6Z). Außerdem beträgt der Anteil der Verzögerungsmanöver auf der A1 80,3 % und auf der A2 im hier dargestellten Fall nur 69,1 % (1Z + 2Z + 3Z).

Für eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h gestaltet sich die Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen in der Zufahrt der Überholspur signifikant anders als bei einem Limit von 130 km/h. Die zugehörige Häufigkeitsverteilung wird in Abbildung 5.15 dargestellt. Die Messdaten wurden im selben Untersuchungszeitraum erfasst wie die WVA-Messdaten aus Abbildung 5.12. Anhand der Häufigkeitsskala ist wieder zu erkennen, dass die Verteilung deutlich breiter ist als auf der A1. Im Vergleich zur A2 mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h ist der Befolgungsgrad am Anfang der Zufahrt im hier dargestellten Fall mit 33,0 % (1Z + 5Z + 6Z) signifikant kleiner. Dies wird auch daran ersichtlich, dass die Verteilung relativ zum Limit deutlich mehr zu größeren Startgeschwindigkeiten verschoben ist als für den Fall einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h. Der Anteil der Verzögerungsmanöver beträgt auf der A2 bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h 69,5 % (1Z + 2Z + 3Z). Dieser Wert ist sehr ähnlich zu dem entsprechenden Wert bei einer Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h (69,1 %). Auf Grund des schlechten Befolgungsgrades am Anfang der Zufahrt ist hier ein deutlich kleinerer Anteil der Verzögerungsmanöver unnötigerweise



**Abbildung 5.15.:** Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der einzelnen Fahrzeuge der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes. Die Geschwindigkeitsänderung basiert für jedes Fahrzeug auf der Differenz zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten am Anfang und Ende der Zufahrt, die mit Hilfe eines Trackingradarsensors erfasst wurden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit betrug 100 km/h.

durchgeführt worden (nur 17,3 % an der Gesamtheit). Der Befolgungsgrad wirkt sich außerdem auf den Anteil der zulässigen Geschwindigkeitserhöhungen in der Zufahrt aus (6Z). Dieser beträgt bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h nur 12,9 % während bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h 27,8 % der Fahrzeugführer eine zulässige Geschwindigkeitserhöhung in der Zufahrt vornahmen.

Die Fahrmanöver in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes auf der A2 bei Braunschweig waren nicht nur für die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten 130 km/h und 100 km/h analysierbar, sondern auch für den Fall ohne gültige Höchstgeschwindigkeit. Für diesen Fall ist zu beachten, dass auf Grund des fehlenden Limits nicht die bekannten 6 Fahrmanöverklassen beobachtbar waren. Es konnte deshalb nur zwischen Verzögerungsmanövern und Beschleunigungsmanövern unterschieden werden. Der Anteil der Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver in der Zufahrt betrug 68,9 % für den Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit. Der Anteil der Beschleunigungsmanöver betrug dem entsprechend 31,1 %.

In Verbindung mit den bereits bekannten Häufigkeiten der Verzögerungsmanöver für die zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von 100 km/h und 130 km/h zeigt sich damit für die A2, dass der Anteil der Verzögerungsmanöver hier unabhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit immer ca. 70 % beträgt. Die Auswertung der Umfrageergebnisse im Fragenkomplex Reaktion im Überwachungsfall (siehe Abschnitt 4.4). hatte gezeigt, dass die Autofahrer im Überwachungsfall an ihrem Geschwindigkeitsbewusstsein beginnen zu zweifeln und deshalb spontan abbremsten. Diese Zweifel treten – wie erwartet – selbst dann auf, wenn gar keine zulässige Höchstgeschwindigkeit gilt.

Auf Grund des konstanten Anteils von Verzögerungsmanövern, hängen der Anteil der Verzögerungsmanöver, die bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit unnötigerweise durchgeführt worden sind, und der Anteil der zulässigen Geschwindigkeitserhöhungen auf der A2 bei Braunschweig nur vom Befolgungsgrad für die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit abseits des Überwachungsortes ab. Eine niedrige zulässige Höchstgeschwindigkeit wird ohne Überwachung schlechter befolgt als eine höhere zulässige Höchstgeschwindigkeit – solange sich der Verkehrsfluss im freien und stabilen Zustand befindet. Dies führt dazu, dass bei einer niedrigen zulässigen Höchstgeschwindigkeit nur ein kleiner Anteil der Verzögerungsmanöver – bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit – unnötigerweise durchgeführt wurde. Im Falle einer hohen zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist der Anteil der unnötigen Verzögerungsmanöver hingegen deutlich höher. Für die zulässigen Geschwindigkeitserhöhungen gilt dies analog.

Auf die Häufigkeitsverteilungen der individuellen Geschwindigkeitsänderungen, die die Fahrzeuge in der Abfahrt der Überholspur auf der A2 erfahren haben, wird hier nicht weiter eingegangen. Im Vergleich zu den Abfahrten der Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A1 sind hier keine signifikanten Unterschiede zu verzeichnen. Die Häufigkeitsverteilungen sind auf der A2 bei Braunschweig zwar etwas breiter als auf der A1, weshalb sich für die Fahrmanöverklassen etwas andere relative Häufigkeiten ergeben, neue Erkenntnisse lassen sich hieraus aber nicht ableiten.

### Fazit

Die Verkehrsflussmessungen am Überwachungsort der A2 bei Braunschweig haben im Bezug auf die Forschungsfrage 1 (Betrachtung der Fahrmanöver) wie die Messungen auf der A1 gezeigt, dass in der Zufahrt von den Fahrzeugführern bevorzugt Verzögerungsmanöver und in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver durchgeführt werden. Die dabei auftretenden mittleren Verzögerungen und Beschleunigungen waren betragsmäßig vergleichbar mit den Werten von der A1. Im Gegensatz zur A1 konnte hier auf der A2 untersucht werden, inwiefern die Fahrmanöver im Überwachungsfall von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängen. Dabei zeigte sich, dass die Häufigkeit der auftretenden Verzögerungsmanöver unabhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ist. Das heißt, die Reaktion der Fahrzeugführer im Überwachungsfall tritt unabhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf.

Für die Forschungsfrage 2 (Betrachtung des Verkehrsflusses) hat die Auswertung der Verkehrsflussmessungen auf der A2 ergeben, dass in der Zufahrt Reduzierungen der mittleren Geschwindigkeiten und in der Abfahrt Erhöhungen der mittleren Geschwindigkeiten festzustellen sind. Wie auf der A1 so wurde daher auch auf der A2 am Überwachungsort ein lokales Minimum der mittleren Geschwindigkeiten des Verkehrsflusses nachgewiesen. Der Betrag der Geschwindigkeitsreduktionen in der Zufahrt zeigte dabei eine Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Mit sinkender zulässiger Höchstgeschwindigkeit erhöhte sich der Betrag der Geschwindigkeitsreduktionen in der Zufahrt. Die Ursache dafür war darin zu finden, dass niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeiten schlechter befolgt werden als höhere. Insgesamt lagen die Werte je nach Fahrspur zwischen ca.  $\pm 0$  km/h und ca.  $-5$  km/h und waren damit vergleichbar mit den Werten von der A1.

Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte hier abhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit mit 0,7 km bis 1,0 km abgeschätzt werden.

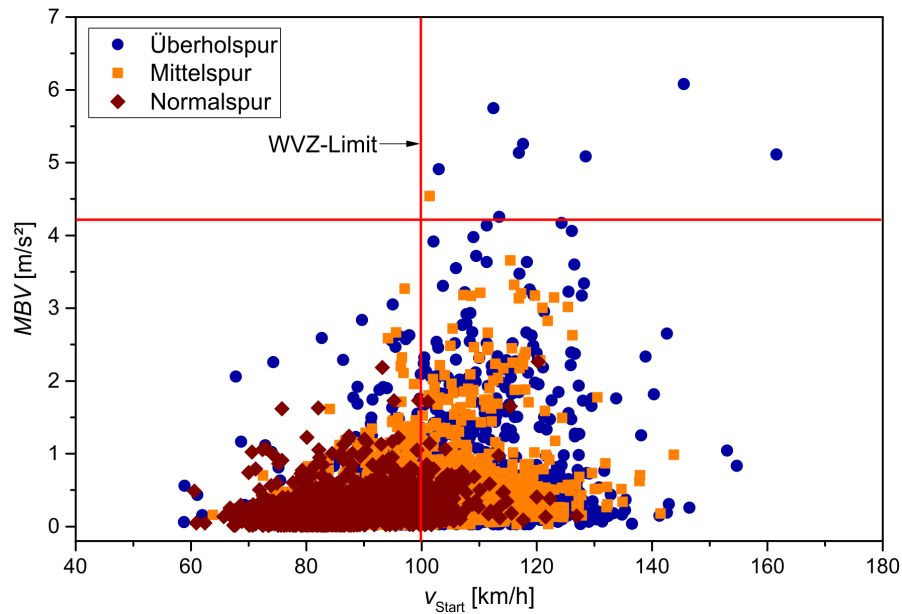
### 5.2.3. Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A2)

Analog zu den Untersuchungen auf der A1 bei Bremen, kamen hier auf der A2 bei Braunschweig die Zeitlücke aufeinanderfolgender Fahrzeuge (THW), die Zeit bis zur Kollision (TTC) und die maximale Bremsverzögerung (MBV) als SSM zum Einsatz. Diese SSM wurden in der Zu- und Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes (Untersuchungsort A) und an einem zweiten Untersuchungsort (Untersuchungsort B) bestimmt. Für die Bestimmung der SSM wurde die gleiche Verfahrensweise gewählt wie bei den Untersuchungen auf der A1.

Der Untersuchungsort B befand sich in Fahrtrichtung gesehen 1,4 km vor dem Untersuchungsort A. Die beiden Orte unterscheiden sich nur bezüglich der am Untersuchungsort A stationär betriebenen Überwachungsgeräte und dem dort befindlichen Anzeigequerschnitt der WVA. Unterschiede bezüglich der Streckengeometrie und der vorhandenen Fahrspuren inklusive Seitenstreifen existieren nicht.

In Abbildung 5.16 sind die MBV-Werte der einzelnen Fahrzeuge über die jeweilige Startgeschwindigkeit aufgetragen worden. Die Werte gehören zur Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes (Untersuchungsort A). Neben den Messwerten wurden zusätzlich das gültige WVZ-Limit (senkrechte rote Linie) und die Grenze zwischen kritischen und unkritischen MBV-Werten (waagerechte rote Linie) eingetragen. Wie auf der A1 so wurden auch hier MBV-Werte  $> 4,2 \text{ m/s}^2$  als kritisch eingestuft.

Die Streuung der MBV-Werte nimmt in Abbildung 5.16 mit steigender Startgeschwindigkeit zu. Dies führt zu einer steigenden Anzahl kritischer MBV-Werte. Da auf der Überholspur die größten Geschwindigkeiten auftreten, zeigt die Überholspur die meisten kritischen MBV-Werte. Für die Mittelspur findet sich nur ein kritischer Wert und für die Normalspur gar kein kritischer Wert. Kritische MBV-Werte deuten auf kritische Verzögerungsmanöver in der Zufahrt hin. Diese sind kontraproduktiv für die Verkehrssicherheit.



**Abbildung 5.16.:** Maximale Bremsverzögerung (MBV) der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes (Untersuchungsort A) bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h.

Die MBV-Werte in Abbildung 5.16 wurden für einen Zeitraum bestimmt, indem am Überwachungsort eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h galt. Auch für den Fall einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h am Überwachungsort und für den Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit konnten die MBV-Werte in der Zufahrt bestimmt werden. Die Verteilungen dieser MBV-Werte über die Startgeschwindigkeit waren in beiden Fällen sehr ähnlich zur Verteilung in Abbildung 5.16. Da fast alle Fahrzeugführer, die ihre Geschwindigkeit in der Zufahrt reduzieren, nur eine kleine Verzögerung wählen, ist der relative Anteil der kritischen Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver sehr gering. Auf der Überholspur erreicht dieser Anteil mit 0,8 % sein Maximum. Eine Abhängigkeit dieses Anteils von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden. Die Wahl des Grenzwertes zur Unterscheidung zwischen kritischen und unkritischen Verzögerungsmanövern hat wie auf der A1 hier keinen nennenswerten Einfluss auf den Anteil kritischer Verzögerungsmanöver.

Am Untersuchungsort B konnte für mehrere Untersuchungszeiträume und unterschiedliche zulässige Höchstgeschwindigkeiten nur ein einziger kritischer MBV-Wert gefunden werden. Dieser trat auf der Überholspur auf. Der Vergleich der MBV-Werte beider Messorte lässt daher den Schluss zu, dass die kritischen MBV-Werte in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes tatsächlich auf die punktuelle Überwachung zurückgeführt werden können. Im Abschnitt 5.1.2 konnte dies bereits für die A1 gezeigt werden. Die Ergebnisse auf der A2 bestätigen nun diese Erkenntnis. Der Anteil der kriti-

Fahrspur	$\langle Q \rangle$ [KFZ/h]	$\langle v \rangle$ [km/h]	Häufigkeit THW $\leq 1$ s [%]
Normalspur	1050	85,9	8,8
Mittelspur	1130	109,1	11,0
Überholspur	850	117,5	18,1

**Tabelle 5.9.:** Häufigkeit des Auftretens von THW  $\leq 1$  s für die 3 Fahrspuren in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes, zusammen mit mittlerer Geschwindigkeit  $\langle v \rangle$  und mittlerer Verkehrsstärke  $\langle Q \rangle$ .

schen Verzögerungsmanöver von weniger als 5 % in der Zufahrt des Überwachungsortes stellt keine Häufung dar. Es ist daher davon auszugehen, dass diese keine Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisionssituationen zur Folge haben. Mit Hilfe der THW und der TTC wird diese Annahme weiter unten in diesem Abschnitt genauer überprüft.

In der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes wurden auch MBV-Werte für mehrere Untersuchungszeiträume bestimmt. Es konnten dabei für alle untersuchten Höchstgeschwindigkeiten keine kritischen Werte gefunden werden. Es existieren daher keine Hinweise für eine Häufung kritischer Verzögerungsmanöver in der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes.

Die Bestimmung der THW zwischen den Fahrzeugen wurde ebenfalls für verschiedene Untersuchungstage und Untersuchungszeiträume durchgeführt. Wie auf der A1, so wurden auch hier THW-Werte  $\leq 1$  s als kritisch eingestuft. Für die Bestimmung der relativen Häufigkeit kritischer THWs wurde wieder die Anzahl der kritischen Werte mit der Anzahl der THWs  $\leq 6$  s ins Verhältnis gesetzt. In Tabelle 5.9 sind die relativen Häufigkeiten des Auftretens kritischer THW-Werte für jede Fahrspur in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes für einen repräsentativen Untersuchungszeitraum gegenübergestellt worden. Die Auflistung zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer kritischen Auffahrsituation (THW  $\leq 1$  s) auf der Überholspur am größten ist, sofern sich ein Fahrzeugführer in einer Nachfahrsituation befindet. Die genauere Betrachtung der Fahrzeugabstände und Zeitlücken ergab, dass die Hauptursache für die Häufung der THWs  $\leq 1$  s auf der Überholspur in der mittleren Geschwindigkeit zu finden ist. Diese nimmt auf der Überholspur im Mittel die größten Werte an und fördert somit das Auftreten kritischer Auffahrsituationen.

In der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes zeigen sich sehr ähnliche Häufigkeiten für die kritischen THW-Werte wie in der Zufahrt. Für verschiedene Untersuchungszeiträume und Werkstage variieren die Häufigkeiten der kritischen Werte. Auf der Überholspur umfasst dieser Variationsumfang beispielsweise Werte zwischen 8,7 % und 21,8 %. Dieser Variationsumfang ist eine Folge des Einflusses der verschiedenen Fahrerkollektive und der zufälligen Fahrzeugverteilungen auf der Straße. Trotz des großen Variationsumfangs ist die Häufigkeit kritischer THW-Werte in jedem Untersuchungszeit-

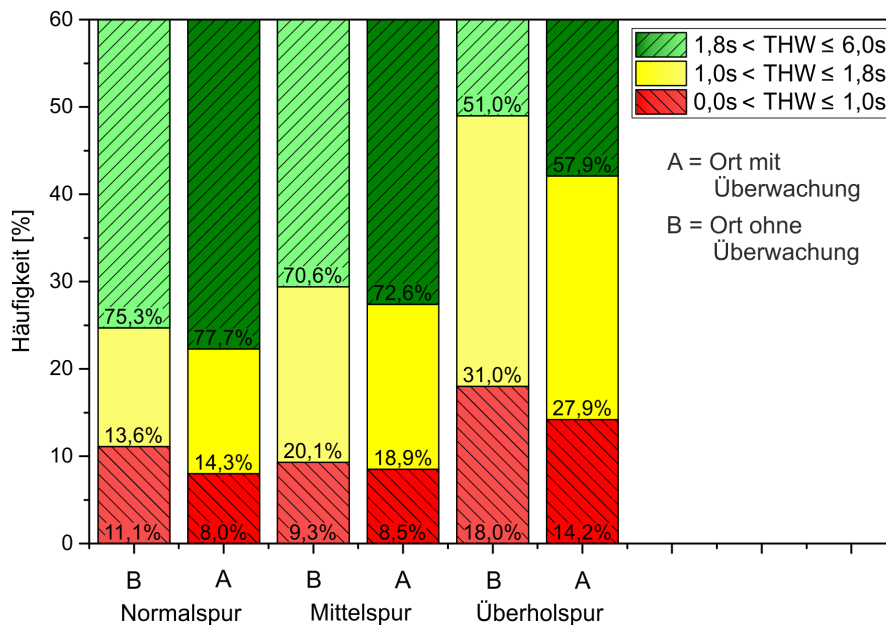
raum auf der Überholspur größer als auf den anderen beiden Fahrspuren. Dieser Effekt war auch bei den Untersuchungen auf der A1 beobachtbar. Im Vergleich zur Überholspur auf der A1 sind die Häufigkeiten kritischer THWs hier auf der A2 tendenziell etwas kleiner.

Auf der A2 bestand die Möglichkeit den Verkehrsfluss am Untersuchungsort A und am Untersuchungsort B mit Hilfe der Trackingradarsensoren zu messen. Zwischen beiden Untersuchungsorten befinden sich keine Anschlussstellen, so dass bei einer Verkehrsflussmessung, die an beiden Untersuchungsorten gleichzeitig durchgeführt wird, die Fahrzeuge jeweils derselben Grundgesamtheit entstammen. Es bestand daher die Möglichkeit den Einfluss des Fahrerkollektivs auf die Verteilung der THWs zu eliminieren. Weil die Wegstrecke zwischen beiden Untersuchungsorten nur 1,4 km beträgt konnte zudem der Einfluss der zufälligen Fahrzeugverteilung reduziert werden. Auf diese Weise war es im Rahmen einer Sonderuntersuchung möglich den Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Häufigkeit kritischer THWs zu bestimmen.

In Abbildung 5.17 sind die Häufigkeitsverteilungen der THWs  $\leq 6$  s für den Überwachungsort ( $\hat{=}$  Untersuchungsort A) und den Untersuchungsort B für jede Fahrspur separat gegenüber gestellt worden. Die Häufigkeitsverteilungen sind hier in drei Bereiche unterteilt worden. Der grüne Bereich umfasst Zeitlücken, die größer sind als der sich aus der Halben-Tacho-Faustformel ergebende Sicherheitsabstand ( $1,8 \text{ s} < \text{THW} \leq 6,0 \text{ s}$ ). Zum gelben Bereich gehören Zeitlücken, die kleiner sind als der mittels Faustformel bestimmte Sicherheitsabstand, die aber noch nicht als kritisch gelten ( $1,0 \text{ s} < \text{THW} \leq 1,8 \text{ s}$ ). Die kritischen Zeitlücken fallen in den roten Bereich ( $0,0 \text{ s} < \text{THW} \leq 1,0 \text{ s}$ ). Je kleiner die Häufigkeit von THWs ist, die in den kritischen Bereich fallen bzw. die kleiner sind als der mittels Faustformel bestimmte Sicherheitsabstand, umso sicherer ist der Verkehrszustand insgesamt.

Der Gegenüberstellung in Abbildung 5.17 ist zu entnehmen, dass für alle 3 Fahrspuren die Häufigkeit kritischer THWs am Überwachungsort geringer ist als am Untersuchungsort B. Für die unkritischen Zeitlücken, die kleiner sind als der mittels Faustformel bestimmte Sicherheitsabstand, gilt dies auf Mittel- und Überholspur ebenfalls. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass die Geschwindigkeitsüberwachung zu einer reduzierten Häufigkeit kritischer THWs führt und somit die Verkehrssicherheit erhöht. Weitere Untersuchungszeiträume im Rahmen der Sonderuntersuchung haben gezeigt, dass sich auf der Überholspur immer eine Reduzierung der kritischen Zeitlücken findet, die auf die Überwachung zurückgeführt werden kann. Für die kritischen Zeitlücken schwankt diese Reduzierung zwischen  $-3,8$  Prozentpunkten und  $-8,5$  Prozentpunkten und ist damit immer signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %). Dies wurde mit Hilfe eines  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest geprüft (siehe Anhang C). Für Normal- und Mittelspur traten die Unterschiede in den Häufigkeiten kritischer THWs zwischen beiden Untersuchungsorten nie signifikant auf. Teilweise zeigte sich am Überwachungsort für die Normalspur auch eine leicht höhere Häufigkeit kritischer THWs als am Untersuchungsort B. Die





**Abbildung 5.17.:** Häufigkeitsverteilung der THWs  $\leq 6$  s für die beiden Untersuchungsorte (A/B). Am Untersuchungsort A befindet sich ein stationäres Geschwindigkeitsüberwachungsgerät. Am Untersuchungsort B fand keine Geschwindigkeitsüberwachung statt. An beiden Untersuchungsorten galt keine zulässige Höchstgeschwindigkeit.

größten Reduzierungen traten auf der Überholspur in den Fällen auf, in denen am Untersuchungsort B eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h galt und diese Höchstgeschwindigkeit kurz hinter dem Überwachungsort auf 100 km/h gesenkt wurde.

Die Reduzierung der Häufigkeiten kritischer THWs am Überwachungsort konnte anhand einer Analyse der Fahrzeugabstände und Zeitlücken auf die verminderte mittlere Geschwindigkeit am Überwachungsort zurückgeführt werden. Mit Hilfe der Sonderuntersuchungen auf der A2 konnte somit gezeigt werden, dass die geschwindigkeitssenkende Wirkung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung die Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen reduziert. Im Rahmen der Untersuchungen auf der A1 konnte dies nur vermutet werden, da dort kein direkter Nachweis möglich war. Die Sonderuntersuchungen lassen außerdem den Schluss zu, dass die Fahrmanöver in der Zufahrt, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver, nicht zu einer Häufung kritischer Auffahrsituationen führen.

Die Betrachtung der TTC erfolgte wie bei der MBV und der THW am Untersuchungs-ort A und am Untersuchungsort B. Der Fokus lag bei dieser Betrachtung auf dem relativen Anteil kritischer Kollisionszeiten  $TTC \leq 5$  s bezogen auf die Fahrzeuge mit einer THW  $\leq 6$  s. Die entsprechenden Anteile wurden immer fahrspurselektiv bestimmt. In der

Zufahrt und der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes betrug der relative Anteil kritischer TTCs maximal 0,7 %. Dieser kleine Anteil stellt keine Häufung kritischer TTCs dar. Innerhalb der Sonderuntersuchung konnte zudem festgestellt werden, dass sich der Überwachungsort und der Untersuchungsort B bezüglich der Häufigkeiten kritischer TTCs nicht signifikant unterscheiden. Der Geschwindigkeitsüberwachung kann somit kein Einfluss auf die Häufigkeit kritischer TTCs zugeschrieben werden. Das heißt, die Fahrmanöver in der Zufahrt und der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver in der Zufahrt, haben keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge.

### Fazit

In diesem Abschnitt wurde für die A2 bei Braunschweig gezeigt, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung in seltenen Fällen zu kritischen Verzögerungsmanövern führt (Forschungsfrage 3). Diese hatten aber keine Häufungen kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen zur Folge (Forschungsfrage 4). Im Gegenteil, es wurde sogar nachgewiesen, dass die Geschwindigkeitsüberwachung zu einer Absenkung der Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen führt.

Es kann an dieser Stelle damit resümiert werden, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung auf der A2 die Verkehrssicherheit erhöht, weil die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses am Überwachungsort ein lokales Minimum annimmt, weil die Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen durch die Überwachung reduziert wird und weil die Überwachung keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge hat (Forschungsfrage 5).

Das heißt außerdem, dass sich auf der A2 bei Braunschweig die verkehrssichernden Wirkungen von WVA und punktueller Geschwindigkeitsüberwachung ergänzen (Forschungsfrage 6).

### 5.2.4. Zusammenfassung (A2)

In den vorhergehenden Abschnitten wurde für die A2 bei Braunschweig der kombinierte Betrieb von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA hinsichtlich der genannten Forschungsfragen analysiert. Auf die Beantwortung der Forschungsfragen wurde dabei bereits teilweise eingegangen. Abschließend lässt sich aus den Ergebnissen dieser Abschnitte Folgendes ableiten.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 1:** *Welche Fahrmanöver sind in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu beobachten und mit welchen Häufigkeiten treten die einzelnen Fahrmanöver auf?*

Die detaillierte Analyse der Fahrmanöver in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsortes ergab, dass in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes die

Fahrzeugführer bevorzugt Verzögerungsmanöver vornehmen und in der Abfahrt vorzugsweise beschleunigen. Die Analyse zeigte weiterhin, dass die Verzögerungsmanöver bereits mehr als 50 m vor dem Überwachungsort von den Fahrzeugführern eingeleitet werden. Der Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt an der Gesamtheit aller Fahrmanöver betrug unabhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit immer ca. 70 %. Diese Unabhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit war zu erwarten. Denn die Umfrageergebnisse hatten bereits gezeigt, dass die Autofahrer im Überwachungsfall an ihrem Geschwindigkeitsbewusstsein beginnen zu zweifeln und deshalb spontan abbremsten. Diese Zweifel treten – wie erwartet – selbst dann auf, wenn gar keine zulässige Höchstgeschwindigkeit gilt. Der Anteil der Verzögerungsmanöver von 70 % ist zwar etwas niedriger als auf der A1, passt aber dennoch zu den Umfrageergebnissen (ca. 50 % bis ca. 80 %).

Auf Grund der Tatsache, dass ca. 70 % der Fahrzeugführer auf der A2 bei Braunschweig im Überwachungsfall unabhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ein Verzögerungsmanöver durchführen, ist der Anteil der Verzögerungsmanöver, die bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit unnötigerweise durchgeführt wurden, nur abhängig vom Befolgungsgrad für die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit. Weil der Befolgungsgrad mit sinkender zulässiger Höchstgeschwindigkeit abnimmt, vorausgesetzt es liegt der freie Verkehrszustand vor, nimmt auch der Anteil unnötiger Verzögerungsmanöver mit sinkender Höchstgeschwindigkeit ab. Für eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h beträgt der Anteil der unnötigen Verzögerungsmanöver ca. 50 % und bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h nur noch ca. 20 %.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 2:** *Welche Änderungen im Verkehrsfluss sind in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort ( $\pm 100$  m) feststellbar?*

Die im Rahmen der Forschungsfrage 1 diskutierten Fahrmanöver führen zu Geschwindigkeitsreduktionen in der Zufahrt und Geschwindigkeitserhöhungen in der Abfahrt. In Folge dessen ist am Überwachungsort ein lokales Minimum der mittleren Geschwindigkeit des Verkehrsflusses feststellbar. Die Geschwindigkeitsreduktionen in der Zufahrt nehmen dabei im Mittel Werte von ca.  $\pm 0$  km/h bis  $-5$  km/h an. Die mittleren Geschwindigkeitserhöhungen in der Abfahrt besitzen betragsmäßig ähnliche Werte von ca.  $+1$  km/h bis  $+4$  km/h. Der Betrag der Geschwindigkeitsreduktionen in der Zufahrt zeigte eine Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Dieser Effekt ist nicht überraschend und tritt auf, weil niedrigere zulässige Höchstgeschwindigkeiten im freien Verkehrszustand schlechter befolgt werden als höhere. Deshalb benötigen die Fahrzeugführer bei niedrigeren Höchstgeschwindigkeiten eine größere Geschwindigkeitsreduktion in der Zufahrt, um einer Ahndung zu entgehen. In den mittleren Beschleunigungen ließ sich dieser Effekt auf Grund seiner kleinen Größe nicht signifikant nachweisen. Insgesamt waren die mittleren Geschwindigkeitsreduktionen der Zufahrt und die mittleren Geschwindigkeitserhöhungen der Abfahrt vergleichbar mit den Werten von der A1.

Auf der Überholspur betrug die mittlere Geschwindigkeitsreduzierung, die insgesamt durch die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung hervorgerufen wurde, zwischen ca.  $-16$  km/h und ca.  $-22$  km/h. Der Verkehrsfluss auf der Mittelspur zeigte hingegen mittlere Reduzierungen von insgesamt ca.  $-10$  km/h bis  $-13$  km/h. Die entsprechenden Werte auf der Normalspur betrugen ca.  $-2$  km/h bis  $-5$  km/h. Die mittleren Geschwindigkeitsreduzierungen auf der Überholspur sind damit größer als die typischen Reduzierungen, die in der Literatur genannt werden. Im Vergleich zu den Überholspuren an den Überwachungsstellen der A1 betragen die Geschwindigkeitsreduzierungen auf der Überholspur der A2 6 km/h bis 12 km/h mehr. Wie bereits beschrieben, zeigt der Betrag der mittleren Geschwindigkeitsreduktion eine Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Auf Grund der fahrspurspezifischen Reduzierungen der mittleren Geschwindigkeiten führte die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung zu kleineren Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren. Diese Reduzierung betrug ca.  $-6$  km/h bis  $-9$  km/h.

Ein Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten einer jeden Fahrspur konnte hier auf der A2 nicht nachgewiesen werden. Selbst im Rahmen der Sonderuntersuchungen, in denen die Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge am Überwachungsstandort und 1,4 km zuvor gleichzeitig gemessen wurden, konnte nicht festgestellt werden, dass die Überwachung eine signifikante Änderung der Streuung bewirkt. Auch wenn kein Einfluss auf die Streuungen der Geschwindigkeiten gezeigt werden konnte, so kann auf Grund der reduzierten Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren dem Überwachungsgerät der A2 bei Braunschweig trotzdem eine verkehrsflossharmonisierende Wirkung zugesprochen werden.

Der mit Hilfe der Trackingradarsensoren aufgezeichnete Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten am Überwachungsstandort ermöglichte eine Abschätzung des Wirkungsbereichs des punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräts auf der A2 bei Braunschweig. Diese Abschätzung ergab einen Wert von ca. 0,7 km bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h und einen Wert von ca. 1,0 km bei einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 130 km/h bzw. für den Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit. Weil der Betrag der mittleren Geschwindigkeitsreduzierungen von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängt (siehe oben), zeigt sich im Wirkungsbereich diese Abhängigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Das heißt, für eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h führt die punktuelle Überwachung zwar zu größeren Geschwindigkeitsreduktionen als bei den anderen beiden Fällen, der Wirkungsbereich ist dann aber auch deutlich kleiner.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 3:** *Hat die Geschwindigkeitsüberwachung kritische Verzögerungsmanöver zur Folge?*

Die aufgetretenen Verzögerungen und Beschleunigungen lagen im Mittel betragsmäßig etwa zwischen  $0,1 \text{ m/s}^2$  und  $0,5 \text{ m/s}^2$  und sind somit vergleichbar mit den auf der A1 bestimmten Werten. Wie auf der A1, so wurde auch auf der A2 beobachtet, dass in

seltenen Fällen kritische Verzögerungsmanöver auftreten. Der Anteil dieser Manöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver betrug maximal 0,8 %. Dieser Wert ist vergleichbar mit dem von der A1 bekannten Wert von 0,4 %.

Am zweiten Untersuchungsort, der sich 1,4 km in Fahrtrichtung vor dem Überwachungs-ort befand, traten diese kritischen Verzögerungsmanöver bis auf eine Ausnahme nicht auf. Es wurde deshalb, wie auf der A1, nachgewiesen, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung Ursache für diese kritischen Manöver ist. In der Abfahrt waren die mittleren Beschleunigungen betragsmäßig mit den mittleren Verzögerungen der Zufahrt vergleichbar. Kritische Verzögerungsmanöver waren in der Abfahrt nicht zu beobachten.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 4:** *Führen die Fahrmanöver in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu einer Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisionssituationen?*

Kritische Auffahrsituationen ( $\text{THW} \leq 1 \text{ s}$ ) traten am häufigsten auf der Überholspur auf. Als Hauptursache konnte dafür die im Vergleich zu den anderen Fahrspuren höhere mittlere Geschwindigkeit gefunden werden. Mit Hilfe des Vergleichs zwischen dem Überwachungsort und dem Untersuchungsort B abseits der Überwachung wurde gezeigt, dass am Überwachungsort der A2 bei Braunschweig weder eine Häufung kritischer Auffahrsituationen noch eine Häufung kritischer Kollisionssituationen ( $\text{TTC} \leq 5 \text{ s}$ ) zu beobachten ist. Es zeigte sich vielmehr ein weiterer positiver Effekt der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung. Es wurde nämlich festgestellt, dass die niedrigere mittlere Geschwindigkeit am Überwachungsort den Anteil kritischer Auffahrsituationen auf der Überholspur signifikant senkt. Dieser Effekt zeigte sich auf der A2 sogar im Fall ohne zulässige Höchstgeschwindigkeit. Bei den Untersuchungen auf der A1 war der Nachweis dieses weiteren positiven Effektes der Geschwindigkeitsüberwachung nicht möglich gewesen. Dort wurde aber bereits anhand des Vergleichs zwischen den Fahrspuren vermutet, dass die Geschwindigkeitsüberwachung den Anteil kritischer THWs reduziert.

Die Häufigkeit kritischer Kollisionssituationen betrug am Überwachungsort maximal 0,7 %. Dieser Wert ist vergleichbar mit den Werten von der A1 und den Werten vom Untersuchungsort B abseits der Überwachung.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 5:** *Welche Schlussfolgerungen können anhand der Fahrmanöver und der Änderungen des Verkehrsflusses bezüglich der Verkehrssicherheit gezogen werden?*

**und zur Forschungsfrage 6:** *Heben sich die positiven Wirkungen, die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung und WVA jeweils auf die Verkehrssicherheit haben, bei der Kombination beider Systeme auf, oder unterstützen sich beide Systeme hinsichtlich der Verkehrssicherheit?*

Auf der A2 bei Braunschweig führt die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung zu einem lokalen Minimum der mittleren Geschwindigkeiten, kleineren Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren und kleineren Häufigkeiten kritischer Auffahrsituationen. Außerdem wurde festgestellt, dass die in seltenen Fällen auftretenden kritischen Verzögerungsmanöver keine Häufung kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen nach sich ziehen. Insgesamt kann daher geschlussfolgert werden, dass das punktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsgerät auf der A2 bei Braunschweig die Verkehrssicherheit lokal erhöht und somit die verkehrssichernde Wirkung der WVA unterstützt. Dies wurde auch bereits für die Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A1 geschlussfolgert. Die Untersuchungen auf der A2 haben zusätzlich gezeigt, dass sich diese verkehrssichernde Wirkung der Geschwindigkeitsüberwachung unabhängig von der angezeigten Höchstgeschwindigkeit der WVA einstellt – selbst bei deaktivierten Anzeigequerschnitten. Untersucht wurde dabei immer nur der freie Verkehrszustand am Überwachungsort.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 7:** *Gibt es ein Verbesserungspotenzial bei der aktuell praktizierten Kombination von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA?*

Aus den vorgestellten Ergebnissen wird ersichtlich, dass sich punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung und WVA aus Sicht der Verkehrssicherheit ergänzen. Dieser positive Effekt besteht aber nur innerhalb des Wirkungsbereichs der punktuellen Überwachung. Eine WVA soll hingegen die Verkehrssicherheit des gesamten Streckenabschnitts positiv beeinflussen. Diese Wirkung kann mit Hilfe der WVA nur dann effektiv erzielt werden, wenn die von der WVA angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf dem gesamten Streckenabschnitt befolgt werden. Da die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung diese Befolgung nur lokal bewirken kann, besteht hier Verbesserungspotenzial.

Die Analyse der Fahrmanöver zeigte, dass viele Fahrzeugführer im Überwachungsfall verzögern, weil sie Zweifel haben bezüglich der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. In seltenen Fällen können diese Verzögerungsmanöver mit kritischen Verzögerungswerten erfolgen. Wenn das Überwachungsgerät am Fuße eines Anzeigequerschnitt betrieben wird und dieser Anzeigequerschnitt eine neue zulässige Höchstgeschwindigkeit anzeigt, dann kann dies unnötige kritische Verzögerungsmanöver provozieren. Diese sind die Folge der Verunsicherung, die unter den Fahrzeugführern auf Grund des gleichzeitigen Auftretens von Überwachung und neuer Höchstgeschwindigkeit entsteht. In diesem Punkt besteht daher ein Verbesserungspotenzial bei der aktuell praktizierten Kombination von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA.

### 5.3. Verkehrsflussmessungen auf der B6 bei Hannover

Dieser Abschnitt wird dazu dienen, die Verkehrsflussmessungen auf der B6 bei Hannover auszuwerten und die Ergebnisse zu diskutieren. Es werden dabei mit der Abschnittskontrolle und der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung zwei völlig verschiedene Überwachungsstrategien betrachtet. Für beide Überwachungsstrategien werden hier die

Forschungsfragen 1 bis 5 des Themenschwerpunkts I jeweils separat beantwortet (Betrachtung der Fahrmanöver, des Verkehrsflusses und der Verkehrssicherheit). Diese Ergebnisse werden dann die Beantwortung der Forschungsfragen 8 und 9 des Themenschwerpunkts III ermöglichen (Vergleich der Abschnittskontrolle in Deutschland mit den Anlagen des Auslands und mit der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung).

Die Verkehrsflussmessungen auf der B6 bei Hannover wurden in 4 Untersuchungsphasen unterteilt, um die oben genannten Forschungsfragen beantworten zu können. Die erste Untersuchungsphase erfolgte bereits im Vorfeld der Einführung der Abschnittskontrolle. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsphase dienten als Referenz für alle folgenden Phasen. Die Untersuchungsphase 2 schloss sich unmittelbar an Phase 1 an. In der Untersuchungsphase 2 wurde der Einfluss der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehr untersucht. Die 3. Untersuchungsphase diente zur Bestimmung des Einflusses punktueller Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehr für den Spezialfall, dass diese den Fahrzeugführern mit einem Hinweisschild angekündigt wird. Für die Untersuchung des Einflusses der Abschnittskontrolle auf den Verkehr diente schließlich die Phase 4.

In der Untersuchungsphase 4 wurden kurze Zeit nach der ersten Inbetriebnahme der Anlage zur Abschnittskontrolle und 1 Jahr danach Verkehrsflussmessungen durchgeführt. Die Abschnittskontrolle befand sich in der Phase 4 noch in einem Testbetrieb. Der Testbetrieb wurde über diverse Medien den Fahrzeugführern angekündigt. Schilder, die auf den mittels Abschnittskontrolle überwachten Streckenabschnitt hinwiesen, waren in der Phase 4 noch nicht vorhanden.

In den Untersuchungsphasen 1 und 4 wurde mit Hilfe von verdeckten Verkehrsflussmessungen an verschiedenen Messorten des Streckenabschnitts der Verkehr lokal erfasst. Der mittlere Abstand zwischen zwei benachbarten Messorten betrug etwa 400 m. Die Messwerte konnten nicht zeitgleich an allen Messorten erfasst werden. Die Messdatenerfassung erfolgte deshalb in den Untersuchungsphasen 1 und 4 gestaffelt über mehrere aufeinanderfolgende Werktage hinweg.

Diese gestaffelte Messdatenerfassung führte dazu, dass den Messdaten unterschiedliche Fahrerkollektive zu Grunde lagen. Dass dies die Messergebnisse nicht beeinflusste wurde mit Hilfe von Langzeitmessungen überprüft. In wiederholten Verkehrsflussmessungen konnte verifiziert werden, dass sich das Geschwindigkeitsprofil des Verkehrsflusses werktags zwischen 07:00 Uhr und 17:00 Uhr nicht signifikant ändert und sich über einen Zeitraum mehrerer Monate reproduzieren lässt. Als Voraussetzungen für diese Reproduzierbarkeit konnten drei Punkte identifiziert werden. Die Messungen müssen bei guten Witterungsbedingungen (kaum Niederschlag und keine Fahrbahnglätte) und an Werktagen erfolgen. Außerdem muss sich die Mittelwertbildung der Messdaten einer jeden Messung über mindestens 3 Stunden erstrecken. Die Untersuchungen an den verschiedenen Messorten umfassten daher typischerweise je einen Zeitraum von 3 bis 5 Stunden.

Die Verkehrsflussmessungen erfolgten mit Hilfe eines Trackingradarsensors, der vom Grünstreifen aus betrieben wurde. Bei den Langzeitmessungen kamen zudem Verkehrszählgeräte zum Einsatz, die ebenfalls mittels Radarwellen vom Grünstreifen aus arbeiteten. In der Untersuchungsphase 4 wurden zusätzlich Trackingradarsensoren eingesetzt, die sich auf dem Einfahrts- und Ausfahrtsportal der Abschnittskontrolle befanden. Diese ermöglichen die Erfassung der Fahrmanöver in der unmittelbaren Umgebung zum Einfahrts- und zum Ausfahrtsportal.

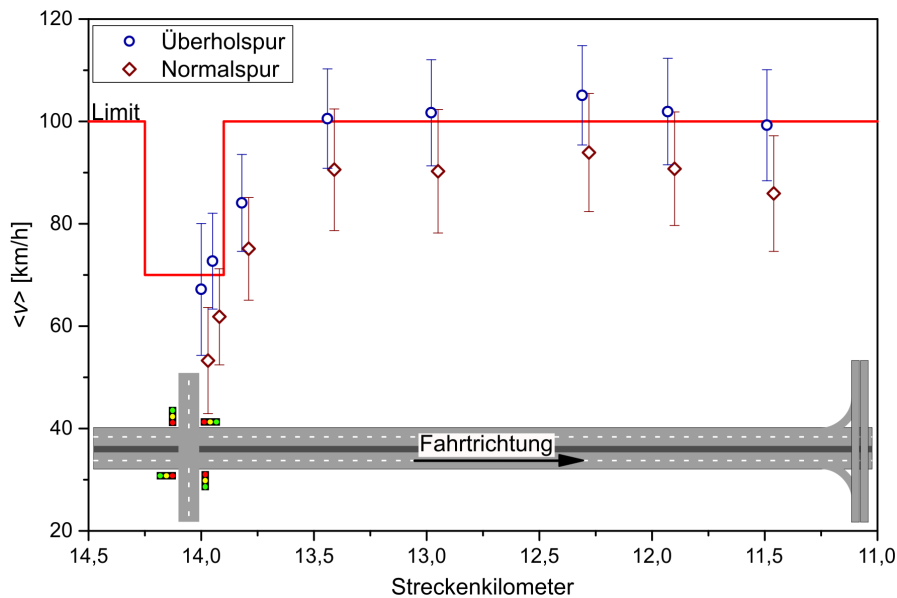
Im Nachgang zu dieser Arbeit sind zwei weitere Untersuchungsphasen geplant. In einer 5. Untersuchungsphase ist vorgesehen den Einfluss der sich im Testbetrieb befindlichen Anlage zur Abschnittskontrolle auf den Verkehrsfluss zu untersuchen. Dabei sollen im Unterschied zur Phase 4 Hinweisschilder auf den überwachten Streckenabschnitt aufmerksam machen. Nach der Konformitätsbewertung der Anlage entsprechend dem Mess- und Eichgesetz und dem damit verbundenen Zustandswechsel vom Testbetrieb in den Echtbetrieb soll die letzte Untersuchungsphase durchgeführt werden. In dieser 6. Phase soll nochmals der Einfluss der Abschnittskontrolle auf den Verkehr betrachtet werden und eine abschließende Bewertung stattfinden. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Dissertation befand sich die Abschnittskontrolle in der Phase 4 (Testbetrieb ohne Hinweisschild).

### 5.3.1. Der unbeeinflusste Verkehr (Untersuchungsphase 1)

Die Verkehrsflussmessungen der Untersuchungsphase 1 zielten auf die Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils des Verkehrsflusses der B6 bei Hannover in der Fahrtrichtung Hannover ab. In dieser Fahrtrichtung wurde später die Abschnittskontrolle eingeführt. Für die Bestimmung des Geschwindigkeitsprofils wurden die mittels Trackingradarsensor aufgezeichneten Einzelfahrzeugdaten nach Fahrspuren separiert und anschließend für jeden Messort die mittlere lokale Geschwindigkeit und die zugehörige Standardabweichung errechnet. In Abbildung 5.18 wird das Profil der mittleren Geschwindigkeit für die Untersuchungsphase 1 dargestellt. Die zugehörigen Standardabweichungen sind in Form von Fehlerbalken eingetragen worden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit (Limit) ist in Form einer roten Linie in Abbildung 5.18 enthalten. Außerdem wird in Abbildung 5.18 der Streckenabschnitt schematisch dargestellt. Erläuterungen zu dieser schematischen Darstellung finden sich im Anhang E.

Anhand des Geschwindigkeitsprofils ist gut zu erkennen, dass die mittleren Geschwindigkeiten beider Fahrspuren am Beginn des Streckenabschnitts in Fahrtrichtung hin ansteigen. Das heißt, dass die Fahrzeugführer in diesem Bereich bevorzugt Beschleunigungsmanöver durchführen. Grund hierfür ist die Lichtzeichenanlage, die den Zufluss zum Streckenabschnitt steuert und deshalb viele der Fahrzeugführer bei Streckenkilometer 14,1 zum Anhalten zwingt. Außerdem wird im Bereich der Lichtzeichenanlage die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auf 70 km/h gesenkt. Ab Streckenkilometer 13,5 erreichen die Fahrzeuge auf der Überholspur im Mittel die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. An den folgenden 3 Messorten wird diese Höchstgeschwindigkeit auf der Überholspur von den Fahrzeugführern mitunter deutlich überschritten. Dies deutet auf



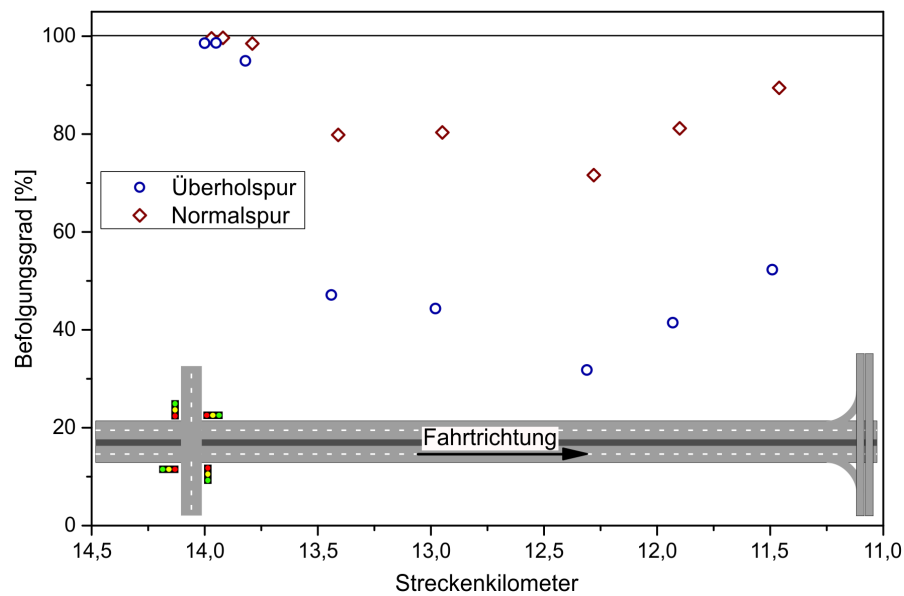


**Abbildung 5.18.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der B6 bei Hannover in der Fahrtrichtung Hannover für die Untersuchungsphase 1. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten des Trackingradarsensors.

eine schlechte Akzeptanz für die zulässige Höchstgeschwindigkeit an diesen Messorten und damit kleine Befolgungsgrade hin. Am Ende des Streckenabschnitts sinkt die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur wieder ab, da sich dort ein Verkehrsknoten befindet und deshalb gehäuft Fahrspurwechsel auftreten.

Die mittlere Geschwindigkeit der Normalspur liegt an allen Messorten unterhalb des zugehörigen Messwertes der Überholspur. Ursache hierfür ist der LKW-Verkehr, der auf diesem Streckenabschnitt ausschließlich die Normalspur nutzt. Das Geschwindigkeitsprofil der Normalspur folgt auf dem gesamten Streckenabschnitt dem Profil der Überholspur mit einer konstanten Geschwindigkeitsdifferenz von ca.  $-10$  km/h. Die vorliegenden Standardabweichungen von ca. 10 km/h und die zugrundeliegenden Stichprobenumfänge von 300 bis 2700 Fahrzeugen je Fahrspur führen zu einer Signifikanzgrenze von 2 km/h. Das heißt, dass hier Geschwindigkeitsdifferenzen von mehr als 2 km/h als signifikant zu bezeichnen sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %).

Neben dem Geschwindigkeitsprofil kann mit Hilfe der Messdaten auch der Verlauf des Befolgungsgrades auf dem Streckenabschnitt beschrieben werden. Weil eine Fahrzeugklassifizierung nicht möglich war, wird hier auf der B6 als Befolgungsgrad der Anteil der Fahrzeuge bezeichnet, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h nicht überschritten. Der Verkehr auf der Normalspur setzte sich aus LKW und PKW zusammen, während auf der Überholspur fast ausschließlich PKW fahren. Es ist daher anzunehmen,



**Abbildung 5.19.:** Verlauf des Befolgungsgrades für den Streckenabschnitt der B6 bei Hannover in der Fahrtrichtung Hannover für die Untersuchungsphase 1. Die Befolgungsgrade basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten des Trackingradarsensors.

dass der Befolgungsgrad der Überholspur den realen Wert der Überholspur gut beschreibt, während der Befolgungsgrad der Normalspur größer ist als der reale Wert der Normalspur, weil unten den beschriebenen Umständen nahezu alle LKWs als Befolger in die Berechnung des Befolgungsgrades einfließen.

In Abbildung 5.19 wird der Verlauf des Befolgungsgrades dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass sich dieser an den Verlauf der mittleren Geschwindigkeit anlehnt. Am Anfang des Streckenabschnitts treten kaum Übertretungen auf und der Befolgungsgrad ist nahe bei 100 %. In der Mitte des Streckenabschnitts erreicht der Befolgungsgrad ein Minimum, bevor er zum Ende hin wieder ansteigt. Normalspur und Überholspur zeigen den gleichen Verlauf, wobei der Befolgungsgrad der Normalspur immer deutlich höher ausfällt als auf der Überholspur. Dies gilt nicht für den Beginn des Streckenabschnitts, der durch die Lichtzeichenanlage geprägt ist. Auch in Abbildung 5.19 ist gut zu erkennen, dass die Akzeptanz für die zulässige Höchstgeschwindigkeit in der Mitte des Streckenabschnitts sehr schlecht ausfällt. Nur 30 % der Fahrzeugführer auf der Überholspur befolgen dort die zulässige Höchstgeschwindigkeit.

### Fazit

Das Geschwindigkeitsprofil der B6 bei Hannover zeigt in Phase 1, dass im ersten Drittel des Streckenabschnitts die mittleren Geschwindigkeiten beider Fahrspuren in Fahrtrichtung hin ansteigen und im letzten Drittel wieder abnehmen. In der Mitte des Streckenab-

schnitts liegt die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur teilweise über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Der Verlauf des Befolgungsgrades zeigt, dass dort auf der Überholspur nur 30 % der Fahrzeugführer die zulässige Höchstgeschwindigkeit befolgen.

In den folgenden Untersuchungsphasen wird nun überprüft, inwieweit die jeweilige Geschwindigkeitsüberwachungsmaßnahme den in der Phase 1 festgestellten Verkehrsfluss ändert und welche Fahrmanöver mit der Überwachung verbunden sind.

#### 5.3.2. Der Einfluss punktueller Überwachung (Untersuchungsphase 2 und 3)

In den Untersuchungsphasen 2 und 3 stand die Bestimmung des Einflusses punktueller Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehr in der Fahrtrichtung Hannover im Vordergrund. Während in der Phase 2 diese punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung ohne Hinweisschild praktiziert wurde, kam in Phase 3 ein Hinweisschild zum Einsatz, um die Überwachung anzukündigen. Das Hinweisschild besaß keine Entfernungsangabe. In der Phase 3 war die Anlage zur Abschnittskontrolle bereits fast vollständig aufgebaut, während die Untersuchungen zur Phase 2 noch vor Beginn des Aufbaus stattfanden.

Die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung wurde in der Phase 2 an einem Werktag in der Fahrtrichtung Hannover bei Streckenkilometer 11,93 durchgeführt. Um in der Untersuchungsphase 3 den Einfluss der bereits bestehenden Komponenten der Abschnittskontrolle vom Einfluss der angekündigten Geschwindigkeitsüberwachung trennen zu können, wurde in Phase 3 neben dem Streckenkilometer 11,93 der Fahrtrichtung Hannover auch der Streckenkilometer 13,00 der Gegenrichtung (Fahrtrichtung Hildesheim) betrachtet. Die Anlage zur Abschnittskontrolle überwacht auf der B6 nur den Verkehr der Fahrtrichtung Hannover. Das Einfahrts- und das Ausfahrtsportal sind mittels Kragträgern deshalb so ausgelegt worden, dass nur der Verkehr der Fahrtrichtung Hannover unter diesen hindurchfahren muss. Außerdem sind die Komponenten zur Frontfotografie eindeutig auf den Verkehr der Fahrtrichtung Hannover ausgerichtet. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Gegenrichtung (Fahrtrichtung Hildesheim) unbeeinflusst von der Anlage zur Abschnittskontrolle fließt. An beiden Streckenkilometern (11,93 der Fahrtrichtung Hannover und 13,00 der Fahrtrichtung Hildesheim) kam ein transportabel einsetzbares punktueller Geschwindigkeitsüberwachungsgerät zum Einsatz. Die ausgewählten Messorte wurden in der Vergangenheit bereits öfters für die amtliche Geschwindigkeitsüberwachung verwendet. Für die Fahrzeugführer waren die Blitz- und Kameragehäuse des Überwachungsgerätes gut sichtbar.

Mit Hilfe eines Trackingradarsensors wurde das Fahrverhalten eines jeden Fahrzeugs in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes aufgezeichnet. Die Fahrzeuge fuhren dabei zunächst am Trackingradarsensor vorbei, der verdeckt vom Grünstreifen aus betrieben wurde. Anschließend entfernten sich die Fahrzeuge von diesem Sensor und fuhren auf das Überwachungsgerät zu. Der Trackingradarsensor erfasste die Fahrzeuge erstmals in einer Entfernung von ca. 30 m und verfolgte diese bis in eine Entfernung von ca. 110 m. Das Überwachungsgerät befand sich in einer Entfernung von ca. 80 m zum

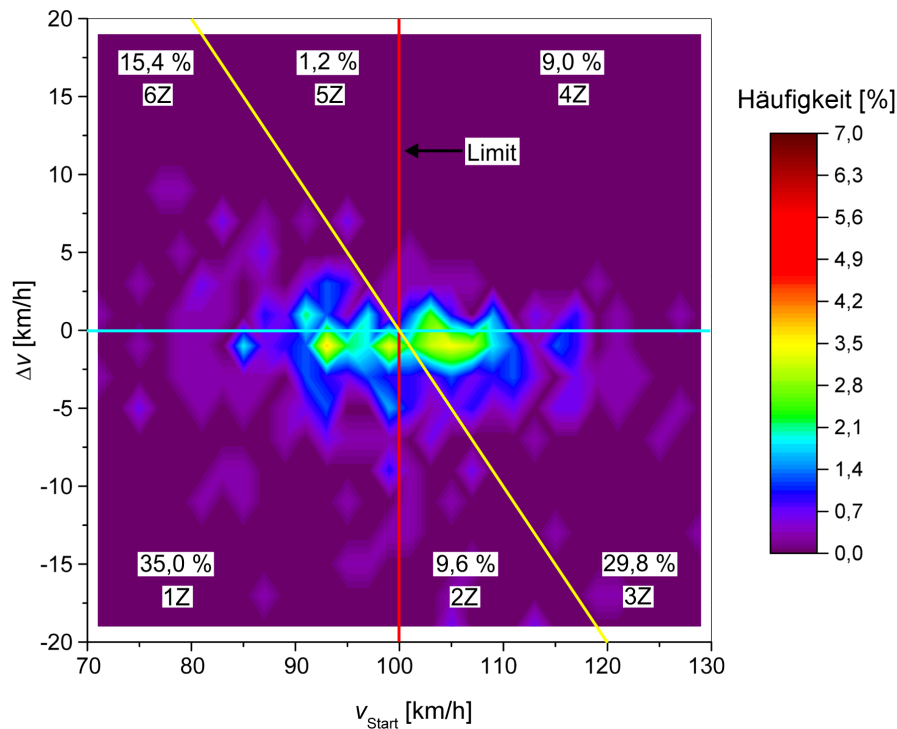
Fahrspur	Überwachung	$\langle v \rangle$ [km/h]	Befolungsgrad [%]
Normalspur	nein	92,0	80,0
	ja	85,3	89,9
Überholspur	nein	102,7	42,5
	ja	96,2	61,2

**Tabelle 5.10.:** Gegenüberstellung der mittleren Geschwindigkeiten  $\langle v \rangle$  und Befolungsgrade in der Untersuchungsphase 2 für die Fälle ohne und mit punktueller Geschwindigkeitsüberwachung bei Streckenkilometer 11,93.

Trackingradarsensor. Die Verkehrsflussmessungen mit dem Trackingradarsensor wurden in beiden Untersuchungsphasen immer über einen größeren Zeitraum durchgeführt als die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung betrieben wurde. Auf diese Weise war es möglich die Änderung des Verkehrsflusses durch den Auf- und Abbau der Geschwindigkeitsüberwachung zu bestimmen.

## Untersuchungsphase 2

Die Stichprobenumfänge variierten in der Untersuchungsphase 2 je nach Fahrspur zwischen 380 und 2600 Fahrzeugen. In Tabelle 5.10 wurden die mittleren Geschwindigkeiten der Untersuchungsphase 2 bei Streckenkilometer 11,93 aufgelistet. Für den Fall ohne Überwachung konnten für beide Fahrspuren mittlere Geschwindigkeiten gemessen werden, die nahezu identisch mit den Werten der Untersuchungsphase 1 sind (siehe Abbildung 5.18). Dies ist eine Folge der bereits beschriebenen Reproduzierbarkeit des Geschwindigkeitsprofils. Im Fall mit Geschwindigkeitsüberwachung sind die mittleren Geschwindigkeiten von Normal- und Überholspur deutlich kleiner als im Fall ohne Überwachung. Für beide Fahrspuren liegt die mittlere Geschwindigkeit im Fall mit Überwachung ca.  $-7$  km/h niedriger als im Fall ohne Überwachung. Diese Geschwindigkeitsreduktion der punktuellen Überwachung ist damit signifikant (Signifikanzgrenze =  $2,0$  km/h). Sie ist zudem in guter Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur (siehe Abschnitt 2.4.2). Die durch die Überwachung verursachten niedrigeren mittleren Geschwindigkeiten haben erhöhte Befolungsgrade zur unmittelbaren Konsequenz. Für die Überholspur steigt der Anteil der Fahrzeugführer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit befolgen, durch die Überwachung um ca.  $+20$  Prozentpunkte. Auf der Normalspur beträgt der entsprechende Wert ca.  $+10$  Prozentpunkte. Die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrspuren ändert sich durch die Überwachung nicht signifikant. Die Streuungen der gefahrenen Geschwindigkeiten (hier nicht dargestellt) betragen im Fall mit Überwachung im Mittel  $1$  km/h bis  $3$  km/h mehr als im Fall ohne Überwachung. Der gefundene Unterschied kann allerdings nicht zweifelsfrei der Geschwindigkeitsüberwachung zugeschrieben werden, weil die Streuungen stark vom Fahrerkollektiv abhängen und den beiden Untersuchungsfällen (mit und ohne Überwachung) unterschiedliche Fahrerkollektive zu Grunde liegen.



**Abbildung 5.20.:** Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes in der Untersuchungsphase 2 bei Streckenkilometer 11,93. Die Geschwindigkeitsänderung basiert für jedes Fahrzeug auf der Differenz zwischen den Fahrzeuggeschwindigkeiten am Anfang und Ende der Zufahrt, die mit Hilfe des Trackingradarsensors erfasst wurden.

Neben der Betrachtung des gesamten Fahrerkollektivs am Überwachungsort wurde im Rahmen der Untersuchungsphase 2 auch das Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeugführer analysiert. Mit Hilfe der Einzelfahrzeugdaten des Trackingradarsensors konnte die Geschwindigkeitsänderung eines jeden Fahrzeugs in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes bestimmt werden. Der Trackingradarsensor verfolgte den auf das Geschwindigkeitsüberwachungsgerät zufließenden Verkehr aus einer abfließenden Perspektive heraus. Das heißt, die Fahrzeuge entfernten sich während der Zufahrt vom Trackingradarsensor. Die Länge der auswertbaren Zufahrt beträgt hier ca. 50 m. In Abbildung 5.20 ist die Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit aufgetragen worden. Als Startgeschwindigkeit wird hier die Geschwindigkeit bezeichnet, mit der das jeweilige Fahrzeug erstmals innerhalb des Erfassungsbereiches des Trackingradars registriert wurde. Es wurden hier nur Fahrzeuge betrachtet, die bei Entfernungen kleiner 32 m erstmals vom Trackingradar detektiert wurden und bis zu Entfernungen größer 78 m verfolgt werden konnten. Der dargestellten Häufigkeitsverteilung liegen die Geschwindigkeitsänderungen

Klasse	1Z	2Z	3Z	4Z	5Z	6Z
Anteil [%]	35,0	9,6	29,8	9,0	1,2	15,4

**Tabelle 5.11.:** Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes auf der Überholspur (Phase 2).

von ca. 330 Fahrzeugen zu Grunde. Wie bereits von der A1 und der A2 bekannt, so können die Fahrmanöver der Autofahrer anhand von Abbildung 5.20 in 6 Fahrmanöverklassen unterteilt werden. In Tabelle 5.11 sind die zugehörigen Häufigkeiten für die Überholspur nochmals aufgelistet worden. Die Verteilung wird hier ausschließlich für die Überholspur angegeben, weil nur für die Überholspur angenommen werden kann, dass für alle Fahrzeugführer die zulässige Höchstgeschwindigkeit 100 km/h betrug.

Anhand der Prozentwerte in Tabelle 5.11 ist erkennbar, dass die Mehrheit der Fahrzeuge erstmals mit einer Geschwindigkeit detektiert wird, die unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h liegt. Der Befolgungsgrad in ca. 50 m Entfernung vor dem Überwachungsgerät beträgt 51,6 % (1Z + 5Z + 6Z). Die Mehrzahl der Fahrzeugführer, die sich in einer Entfernung von etwa 50 m vor dem Überwachungsgerät an die zulässige Höchstgeschwindigkeit halten, verzögert in der Zufahrt ihre Geschwindigkeit. Insgesamt konnte dieses Verhalten bei 35,0 % der Fahrzeugführer festgestellt werden (1Z). Bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit sind diese Verzögerungsmanöver unnötigerweise durchgeführt worden. Während die Umfrageergebnisse nur auf unnötige Bremsmanöver für Streckenabschnitte mit WVA hindeuteten, konnte dieses Verhalten nun auch für diesen Streckenabschnitt ohne WVA beobachtet werden. Der Anteil der Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver beträgt 74,4 % (1Z + 2Z + 3Z). Dies zeigt, dass in der Zufahrt bevorzugt Verzögerungsmanöver durch die Fahrzeugführer vorgenommen wurden. Für einen kleinen Teil der Fahrzeugführer 10,2 % (4Z + 5Z) muss angenommen werden, dass sich diese der Überwachungssituation nicht bewusst waren, da sie ihre Geschwindigkeit in der Zufahrt unzulässigerweise erhöhten. Am Überwachungsort wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60,0 % (1Z + 2Z + 6Z) der Fahrzeugführer befolgt. Dieser Wert passt erwartungsgemäß zum Befolgungsgrad der Überholspur im Überwachungsfall in Tabelle 5.10. Es ergibt sich nur ein kleiner Unterschied in beiden Befolgungsgraden, weil der Trackingradarsensor die Geschwindigkeitsänderung immer auf das Ende des einzelnen Trackingvorgangs bezieht und sich dieses Ende in Fahrtrichtung gesehen meist hinter dem Überwachungsort befand. In der Zufahrt erhöht sich der Befolgungsgrad auf der Überholspur um +8,4 Prozentpunkte (2Z – 5Z). Der Vergleich dieser Befolgungsgraderhöhung mit den Werten aus Tabelle 5.10 zeigt, dass von den ca. +20 Prozentpunkten Erhöhung des Befolgungsgrades im Überwachungsfall fast die Hälfte auf den letzten 50 m erzielt wird.

Die Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge der Überholspur konnte auch für den Fall ohne Überwachung in Abhängigkeit von der

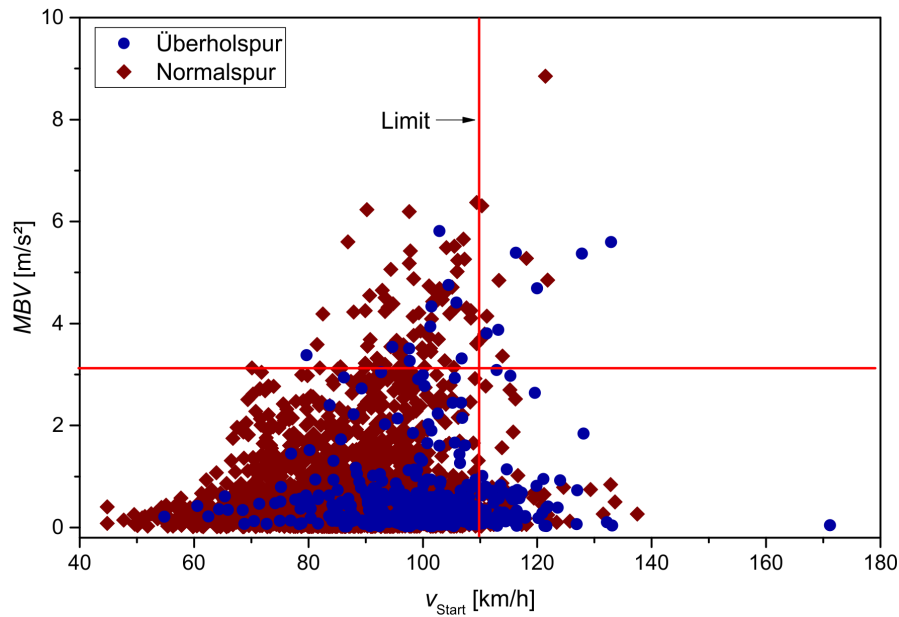
Startgeschwindigkeit ermittelt werden. Für diesen Fall konnte nur bei 46,1 % der Fahrzeuge eine Geschwindigkeitsreduktion im Bereich von Streckenkilometer 11,93 nachgewiesen werden. Dieser Wert zeigt, dass ohne Überwachung an diesem Messort Geschwindigkeitserhöhungen und Geschwindigkeitsreduzierungen etwa gleich wahrscheinlich sind. Der Vergleich mit den entsprechenden relativen Häufigkeiten im Überwachungsfall macht die Wirkung der Überwachung nochmals deutlich.

In der 50 m langen Zufahrt konnten die Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten für definierte Entfernungen zum Trackingradarsensor zusammengefasst und gemittelt werden. Damit war eine Betrachtung der Änderungen der mittleren Geschwindigkeiten in der Zufahrt möglich. Es zeigte sich, dass die mittleren Geschwindigkeiten des Verkehrsflusses bei der Fahrspuren in der Zufahrt, auf Grund der bevorzugt durchgeführten Verzögerungsmanöver, absinken. Für die Überholspur beträgt die Geschwindigkeitsreduzierung der Fahrzeuge zwischen dem Anfang der Zufahrt und dem Überwachungsort  $-1,7$  km/h. Für die Normalspur findet sich ein ähnlicher Wert von  $-1,8$  km/h. Diese Reduzierungen sind damit sowohl auf der Normalspur als auch auf der Überholspur nicht signifikant (Signifikanzgrenze =  $2,0$  km/h). Die zugehörigen mittleren Verzögerungen in der Zufahrt betragen unabhängig von der Fahrspur ca.  $-0,1$  m/s<sup>2</sup> bis  $-0,5$  m/s<sup>2</sup>.

Da für diesen Überwachungsort bereits bekannt ist, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung zu einer Reduktion der mittleren Geschwindigkeiten von ca.  $-7$  km/h führt, kann mit Hilfe der Geschwindigkeitsänderungen in der Zufahrt der Wirkungsbereich der Überwachungsmaßnahme abgeschätzt werden. Weil für die Abfahrt keine Messdaten vorlagen, muss diese Abschätzung hier unter der Annahme erfolgen, dass die Beschleunigungsmanöver in der Abfahrt mit betragsmäßig ähnlichen Beschleunigungen erfolgen wie die Verzögerungsmanöver in der Zufahrt. Wenn davon ausgegangen wird, dass dies auf den Verkehrsfluss der B6 zutrifft, kann der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung ohne Hinweisschild mit insgesamt  $2 \times 200$  m =  $0,4$  km abgeschätzt werden. Dieser Wert ist in guter Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur (siehe Abschnitt 2.4.2) und vergleichbar mit den Werten, die auf der A1 und der A2 bestimmt wurden.

Abschließend zur Untersuchungsphase 2 wird nun noch die Verkehrssicherheit im Bereich von Streckenkilometer 11,93 mit Hilfe von SSM für die Fälle mit und ohne Überwachung untersucht. Wie auf der A1 und der A2 konnten hier auf der B6 mit Hilfe der Daten des Trackingradarsensors die MBV, die THW und die TTC bestimmt werden.

In Abbildung 5.21 sind für die Zufahrt des Streckenkilometers 11,93 im Fall mit Geschwindigkeitsüberwachung die ermittelten Werte der MBV einer jeden Fahrspur über die Startgeschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs aufgetragen worden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist hier mit einer senkrechten roten Linie eingetragen worden. Die Grenze zwischen kritischen und unkritischen MBV-Werten wird hingegen durch die waagerechte rote Linie symbolisiert. MBV-Werte  $> 3,1$  m/s<sup>2</sup> werden in dieser Arbeit für die B6



**Abbildung 5.21.:** Maximale Bremsverzögerung (MBV) der einzelnen Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit in der Zufahrt des Streckenkilometers 11,93 im Fall mit Geschwindigkeitsüberwachung (Phase 2).

als kritisch eingestuft. Dies entspricht einer Geschwindigkeitsreduzierung von 100 km/h auf 77 km/h innerhalb von 2,0 s. Wenn ein Fahrzeug eine solche Verzögerung durchführt und hinter diesem Fahrzeug ein weiteres Fahrzeug (100 km/h) im Sicherheitsabstand von 50 m folgt, dann wird dieses nachfolgende Fahrzeug innerhalb von weiteren 2,9 s den ursprünglichen Sicherheitsabstand um mehr als die Hälfte unterschreiten, sofern es sich gleichförmig weiterbewegt. Das heißt, innerhalb einer Zeitspanne kleiner 5 s wird das hintere Fahrzeug durch das Verzögerungsmanöver des vorderen Fahrzeugs zu einer Reaktion gezwungen. Deshalb werden auf der B6 MBV-Werte  $> 3,1 \text{ m/s}^2$  als kritisch eingestuft.

Die Streuung der MBV-Werte nimmt in Abbildung 5.21 mit steigender Startgeschwindigkeit zu. Deshalb werden kritische MBV-Werte mit steigender Startgeschwindigkeit immer wahrscheinlicher. Kritische MBV-Werte markieren kritische Verzögerungsmanöver. Diese Fahrmanöver stellen ein potenzielles Sicherheitsrisiko in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes dar. Sie sind deshalb kontraproduktiv im Sinne der Verkehrssicherheit. Auf der Normalspur erreicht der relative Anteil gemessen an der Gesamtheit aller Fahrmanöver mit 2,5 % den größten Wert. Für die Überholspur beträgt der relative Anteil 2,3 %. Die Werte betragen weniger als 5 %, weshalb an dieser Stelle nicht von einer Häufung zu sprechen ist. Im Fall ohne Geschwindigkeitsüberwachung traten am Untersuchungsorrt keine kritischen MBV-Werte auf. Es konnte daher hier auf der B6 analog zur A1 und zur A2 (siehe Abschnitt 5.1.2 und 5.2.2) festgestellt werden,



dass durch die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung kritische Verzögerungsmanöver verursacht werden. Die gefundenen Häufigkeiten sind signifikant größer als die auf der A1 und der A2 gefundenen Werte. Dies wurde mit Hilfe eines  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstests und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % geprüft (siehe Anhang C). Ursache hierfür dürfte die schlechtere Vorhersehbarkeit der Überwachungssituation sein. Während auf der A1 und der A2 die stationäre Überwachung rund um die Uhr betrieben wird, findet die transportable Überwachung auf der B6 nur von Zeit zu Zeit statt. Es wurde überprüft, dass die Wahl des Grenzwertes für kritische MBV-Werte keinen nennenswerten Einfluss auf diesen Vergleich hat.

Um zu untersuchen, ob die kritischen Verzögerungsmanöver im Überwachungsfall zu einer Häufung kritischer Kollisionssituationen führen, wurden die TTCs zwischen allen Fahrzeugen betrachtet. Dabei wurden TTCs  $\leq 5$  s als kritisch eingestuft, wie dies auch bereits bei den Untersuchungen auf der A1 und der A2 der Fall war. Es stellte sich heraus, dass die relative Häufigkeit kritischer TTCs, bezogen auf alle Fahrzeuge mit einer THW  $\leq 6$  s, maximal 0,5 % betrug. Dieser Prozentwert war unabhängig davon, ob eine Geschwindigkeitsüberwachung stattfand oder nicht. Der Geschwindigkeitsüberwachung kann somit kein Einfluss auf die Häufigkeit kritischer TTCs zugeschrieben werden. Das heißt, die Fahrmanöver in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver, haben keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge.

Neben der MBV und der TTC diene auch die THW der Betrachtung der Verkehrssicherheit. Als kritisch gelten THW-Werte  $\leq 1$  s. Diese deuten auf kritische Auffahrsituationen zwischen den Fahrzeugen hin. Bezogen auf alle Fahrzeuge mit einem THW-Wert  $\leq 6$  s betrug die relative Häufigkeit von Fahrzeugen mit einem kritischen THW-Wert am Untersuchungsort zwischen 3 % und 13 %. Die Häufigkeiten der Überholspur waren dabei immer größer als die Häufigkeiten auf der Normalspur. Dies konnte teilweise der größeren mittleren Geschwindigkeit und teilweise der größeren Häufigkeit kleiner Fahrzeugabstände (Abstände  $< 30$  m) auf der Überholspur zugeschrieben werden. Trotzdem im Überwachungsfall die mittleren Geschwindigkeiten auf beiden Fahrspuren signifikant gesenkt werden, unterscheiden sich die Häufigkeiten kritischer THWs zwischen beiden Untersuchungsfällen kaum. Die Hauptursache dafür ist sehr wahrscheinlich darin zu finden, dass in beiden Untersuchungsfällen jeweils andere Fahrerkollektive betrachtet wurden. Die Verkehrsflussmessungen hier auf der B6 konnten somit für die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung keinen Einfluss auf die Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen nachweisen.

### Untersuchungsphase 3

In der Untersuchungsphase 3 wurde die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung an einem Werktag für die Fahrtrichtung Hannover bei Streckenkilometer 11,93 und an einem weiteren Werktag für die Fahrtrichtung Hildesheim bei Streckenkilometer 13,00 durchgeführt. Die Geschwindigkeitsüberwachung wurde jeweils mit einem Hinweisschild

Fahrspur	Überwachung	$\langle v \rangle$ [km/h]	Befolungsgrad [%]
Normalspur	nein	89,9	87,3
	ja	77,7	99,0
Überholspur	nein	100,2	53,5
	ja	88,1	88,3

**Tabelle 5.12.:** Gegenüberstellung der mittleren Geschwindigkeiten  $\langle v \rangle$  und Befolungsgrade in der Untersuchungsphase 3 für die Fälle ohne Geschwindigkeitsüberwachung und mit angekündigter Geschwindigkeitsüberwachung bei Streckenkilometer 11,93.

ca. 140 m vor dem Überwachungsgerät den Fahrzeugführern angekündigt. Es wird im Folgenden deshalb auch von angekündigter Geschwindigkeitsüberwachung gesprochen. Der Trackingradarsensor befand sich bei beiden Streckenkilometern in einer ähnlichen Position bezüglich des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes wie in der Untersuchungsphase 2.

In Tabelle 5.12 sind die mittleren Geschwindigkeiten der Untersuchungsphase 3 bei Streckenkilometer 11,93 aufgelistet worden. Da zum Zeitpunkt der Phase 3 die Anlage zur Abschnittskontrolle bereits fast vollständig aufgebaut war und somit bereits auf den Verkehrsfluss einwirkte, betragen die mittleren Geschwindigkeiten beider Fahrspuren für den Fall ohne Überwachung ca. 2 km/h weniger als in den Untersuchungsphasen 1 und 2 (siehe Abbildung 5.18 und Tabelle 5.10). Dieser Geschwindigkeitsunterschied liegt zwar direkt an der Signifikanzgrenze, aber anhand der Befolungsgrade wird der Einfluss der Anlage zur Abschnittskontrolle bereits deutlich. Der Stichprobenumfang betrug in der Untersuchungsphase 3 bei Streckenkilometer 11,93 je nach Fahrspur 430 bis 2300 Fahrzeuge. Aus Tabelle 5.12 geht hervor, dass für den Fall mit angekündigter Geschwindigkeitsüberwachung die mittleren Geschwindigkeiten von Normalspur und Überholspur deutlich kleiner sind als für den Fall ohne Überwachung. Auf beiden Fahrspuren wird die mittlere Geschwindigkeit durch die angekündigte Geschwindigkeitsüberwachung um ca.  $-12$  km/h signifikant reduziert. Die mittleren Geschwindigkeiten liegen damit im Fall mit angekündigter Geschwindigkeitsüberwachung signifikant unter den mittleren Geschwindigkeiten des Falls mit unangekündigter Geschwindigkeitsüberwachung (siehe Tabelle 5.10).

Der Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten in den Untersuchungsphasen 1, 2 und 3 zeigt somit, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses senkt und diese Wirkung mit Hilfe von Hinweisschildern deutlich erhöht werden kann. Dies konnte in der Literatur ebenfalls gezeigt werden (siehe Abschnitt 2.4.2). Die größeren Geschwindigkeitsreduzierungen im Fall der angekündigten Geschwindigkeitsüberwachung ziehen erwartungsgemäß höhere Befolungsgrade nach sich.

Klasse	1Z	2Z	3Z	4Z	5Z	6Z
Anteil [%]	55,5	5,3	7,0	2,5	1,4	28,3

**Tabelle 5.13.:** Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes auf der Überholspur (Fahrtrichtung Hannover, Phase 3).

Die Standardabweichungen der Geschwindigkeitsverteilungen betrugen im Fall mit angekündigter Überwachung im Mittel 2 km/h mehr als im Fall ohne Überwachung. Wie in der Untersuchungsphase 2 kann dieser Unterschied allerdings nicht zweifelsfrei der Geschwindigkeitsüberwachung zugeschrieben werden, da in beiden Untersuchungsfällen verschiedene Fahrerkollektive zur Messung beigetragen haben.

Für die Fahrtrichtung Hildesheim, die nur in der Untersuchungsphase 3 betrachtet wurde, ergaben sich für den Fall der angekündigten Geschwindigkeitsüberwachung vergleichbare Reduzierungen der mittleren Geschwindigkeiten wie in der Fahrtrichtung Hannover. Auch die mittleren Geschwindigkeiten im Fall ohne Überwachung waren in der Fahrtrichtung Hildesheim ähnlich zu denen der Fahrtrichtung Hannover. Es konnte damit ausgeschlossen werden, dass der Einfluss der Anlage zur Abschnittskontrolle die Ergebnisse der Untersuchungsphase 3 verfälschte.

Wie in der Untersuchungsphase 2 so wurde auch in der Untersuchungsphase 3 für die Zufahrt die Häufigkeitsverteilung der individuellen Geschwindigkeitsänderungen der Fahrzeuge der Überholspur in Abhängigkeit von der Startgeschwindigkeit bestimmt. Die unterschiedlichen Fahrmanöver konnten in die bekannten 6 Fahrmanöverklassen eingeteilt werden. In der Tabelle 5.13 sind die Anteile dieser 6 Fahrmanöverklassen für die Fahrzeuge auf der Überholspur in der Fahrtrichtung Hannover aufgelistet worden. Es wurden nur Fahrzeuge berücksichtigt, die in Entfernungen kleiner 32 m erstmals detektiert wurden und dann bis zu Entfernungen größer 78 m verfolgt werden konnten. Die Häufigkeiten basieren hier auf einer Stichprobe von ca. 350 Fahrzeugen.

Beim Vergleich mit den entsprechenden Werten aus Phase 2 (siehe Tabelle 5.11) wird deutlich, dass in Phase 3 auf Grund des Hinweisschildes der Befolgungsgrad in ca. 50 m Entfernung vor dem Überwachungsgerät mit 85,2 % (1Z + 5Z + 6Z) etwa +30 Prozentpunkte größer ist. Für die Messwerte aus Phase 3 lässt sich weiterhin feststellen, dass analog zu Phase 2 die Mehrzahl der Fahrzeugführer, die sich in einer Entfernung von etwa 50 m vor dem Überwachungsgerät an die zulässige Höchstgeschwindigkeit halten, in der Zufahrt verzögert. Dies gilt in Phase 3 für insgesamt 55,5 % der Fahrzeugführer (1Z). Betrachtet man den Anteil aller Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit, so beläuft sich dieser in Phase 3 auf 67,8 % (1Z + 2Z + 3Z). Der Vergleich mit der entsprechenden Häufigkeit aus Phase 2 (74,4 %) zeigt, dass im Fall mit angekündigter Überwachung Geschwindigkeitsreduktionen in der Zufahrt nicht so häufig auftreten wie bei der unangekündigten Überwachung. Die mittlere Geschwindigkeit ist im angekündig-

ten Überwachungsfall am Überwachungsort trotzdem niedriger als im unangekündigten Fall, weil die Fahrzeugführer bereits früher beginnen ihre Geschwindigkeit zu reduzieren. Da in der Phase 3 in der Zufahrt weniger Geschwindigkeitsreduktionen auftreten, erhöht sich auch der Befolgungsgrad in der Zufahrt nicht so deutlich wie in der Phase 2. In der Phase 3 beträgt die Befolgungsgraderhöhung in der Zufahrt +3,9 Prozentpunkte (2Z – 5Z). Für die Phase 2 ergab sich ein Wert von +8,4 Prozentpunkten.

Mit Hilfe der Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten konnte in der Untersuchungsphase 3 ebenfalls der Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten in der Zufahrt ausgewertet werden. Für die Überholspur betrug die Geschwindigkeitsreduzierung im Mittel  $-1,4$  km/h und für die Normalspur  $-1,3$  km/h. Beide Werte sind sehr ähnlich zueinander, nicht signifikant und betragsmäßig vergleichbar mit den Werten der Untersuchungsphase 2. In Analogie zur oben gewonnenen Erkenntnis folgt daraus, dass die niedrigere mittlere Geschwindigkeit am Überwachungsort im Fall der angekündigten Überwachung auf dem frühzeitigen Einleiten von Verzögerungsmanövern hinter dem Hinweisschild basiert. Die mittleren Verzögerungen in der 50 m langen Zufahrt nehmen Werte von ca.  $-0,1$  m/s<sup>2</sup> bis  $-0,5$  m/s<sup>2</sup> an. Diese Werte sind ebenfalls vergleichbar mit den Werten der Phase 2.

Vorausgesetzt, dass die Beschleunigungsmanöver der Abfahrt vergleichbar mit den Verzögerungsmanövern in der Zufahrt sind und die Verzögerungsmanöver vor dem Überwachungsort unmittelbar hinter dem Hinweisschild beginnen, kann der Wirkungsbereich der angekündigten Überwachung mit 0,5 km abgeschätzt werden. Diese Abschätzung setzt sich aus dem Abstand zwischen Hinweisschild und Überwachungsort von 140 m und der abgeschätzten Beschleunigungsstrecke der Abfahrt von 360 m zusammen. Diese Abschätzung deutet daraufhin, dass sich der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung durch das Hinweisschild erhöht.

Auch in der Untersuchungsphase 3 wurde die Verkehrssicherheit im Bereich von Streckenkilometer 11,93 mit Hilfe der bekannten SSM für die Fälle mit angekündigter Überwachung und ohne Überwachung untersucht. Bezüglich der kritischen Verzögerungsmanöver konnte mit Hilfe der MBV festgestellt werden, dass diese im Fall ohne Überwachung nicht auftreten. Für den Fall mit angekündigter Überwachung waren in seltenen Fällen kritische Verzögerungsmanöver zu beobachten. Die relativen Anteile bezogen auf die Gesamtheit aller Fahrmanöver betrugen aber nur 0,7 % für die Überholspur und 0,3 % für die Normalspur. Diese Prozentwerte sind signifikant kleiner als im Fall der unangekündigten Überwachung (Phase 2). Es wird an dieser Stelle daher geschlossen, dass das Hinweisschild die Häufigkeit kritischer Verzögerungsmanöver reduziert, weil es die Aufmerksamkeit der Fahrzeugführer erhöht. Diese Form der Aufmerksamkeitserhöhung zeichnete sich bereits in den Umfrageergebnissen ab (siehe Abschnitt 4.4).

Im angekündigten Überwachungsfall betrug die relative Häufigkeit kritischer TTCs ( $\leq 5$  s) bezogen auf die Gesamtheit aller Fahrzeuge mit einer THW  $\leq 6$  s maximal 0,3 %. Im Fall ohne Überwachung betrug die relative Häufigkeit maximal 0,5 %. Das heißt, die

Fahrmanöver in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver, haben keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge. Dies konnte in der Untersuchungsphase 2 für den Fall der unangekündigten Überwachung ebenfalls gezeigt werden.

Die relative Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen ( $\text{THW} \leq 1 \text{ s}$ ) bezogen auf alle Fahrzeuge in einer Nachfahrsituation ( $\text{THW} \leq 6 \text{ s}$ ) betrug in Phase 3 am Untersuchungsort zwischen 3 % und 14 %. Ein Einfluss der angekündigten Geschwindigkeitsüberwachung auf die Häufigkeit kritischer THWs konnte hier auf der B6 nicht festgestellt werden.

Da die Verkehrsflussmessungen mit dem Trackingradarsensor in den Untersuchungsphasen 2 und 3 jeweils über einen längeren Zeitraum durchgeführt wurden als die punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungen, konnte anhand der Messdaten nachvollzogen werden, wie groß der zeitliche Nachhall der durchgeführten Überwachung ist. Die Messdaten zeigen, dass der Wert der mittleren Geschwindigkeit spätestens 60 Minuten nach Abbau des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes das Vorniveau erreicht. Da an beiden Überwachungsorten bereits öfters punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung betrieben wurde, ist aber nicht ausgeschlossen, dass das Vorniveau bereits durch die vorhergehenden Überwachungsmaßnahmen beeinflusst ist und der zeitliche Nachhall deshalb größer als 60 Minuten ist. In der Literatur finden sich Werte für den zeitlichen Nachhall von bis zu 6 Monaten (siehe Abschnitt 2.4.2).

#### Fazit

Es kann an dieser Stelle kurz zusammengefasst werden, dass von den Fahrzeugführern in der Zufahrt zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf der B6 bei Hannover bevorzugt Verzögerungsmanöver durchgeführt werden (Forschungsfrage 1). Die dabei auftretenden mittleren Verzögerungen sind vergleichbar mit den Werten von der A1 und der A2.

Diese Fahrmanöver haben im Falle der unangekündigten Überwachung eine Absenkung der mittleren Geschwindigkeit von insgesamt ca.  $-7 \text{ km/h}$  auf beiden Fahrspuren zur Folge. In Verbindung mit einem Hinweisschild kann diese Absenkung auf insgesamt ca.  $-12 \text{ km/h}$  erhöht werden (Forschungsfrage 2). Das Hinweisschild bewirkt außerdem eine Erhöhung des abgeschätzten Wirkungsbereichs von  $0,4 \text{ km}$  auf  $0,5 \text{ km}$ .

Die unangekündigte Überwachung führt in vereinzelten Fällen zu kritischen Verzögerungsmanövern am Überwachungsort (Forschungsfrage 3). Der Anteil dieser kritischen Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver war hier signifikant höher als auf der A1 und der A2. Es konnten aber keine Häufungen kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen nachgewiesen werden (Forschungsfrage 4). Mit dem Einsatz eines Hinweisschildes wurde der Anteil der kritischen Verzögerungsmanöver signifikant auf das von der A1 und der A2 bekannte Niveau gesenkt.

Bezüglich der Forschungsfrage 5, welche die Verkehrssicherheit betrachtet, ergibt sich daher, dass die Verkehrssicherheit mit Hilfe der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf der B6 lokal erhöht wird, weil die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses sinkt. Diese Wirkung kann mit Hilfe eines Hinweisschildes erhöht werden.

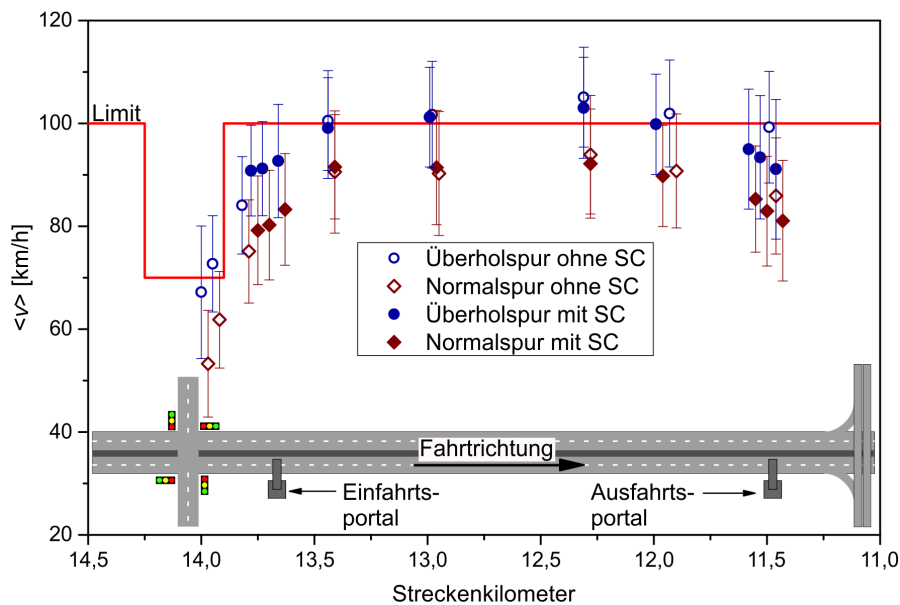
### 5.3.3. Der Einfluss der Anlage zur Abschnittskontrolle (Untersuchungsphase 4)

Zu Beginn der Untersuchungsphase 4 waren die Bauarbeiten an der Anlage zur Abschnittskontrolle abgeschlossen. Die Anlage befand sich während der gesamten Untersuchungsphase in einem Testbetrieb. Dies wurde den Verkehrsteilnehmern über diverse Medien mitgeteilt. Auf Grund von Verzögerungen im Pilot-Projekt und widersprüchlichen Zeitangaben in den verschiedenen Medienbeiträgen ist aber anzunehmen, dass ein Teil der Fahrzeugführer während der Phase 4 bereits von einem Echtbetrieb der Anlage ausgegangen ist.

Die Geschwindigkeitsprofile der beiden Fahrspuren sind in Abbildung 5.22 für die Untersuchungsphasen 1 und 4 direkt gegenüber gestellt worden. Die hier dargestellten mittleren Geschwindigkeiten der Phase 4 wurden kurze Zeit nach der ersten Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle gemessen. Zur Untersuchungsphase 1 gehören die Messwerte ohne Abschnittskontrolle (ohne SC) und zur Untersuchungsphase 4 gehören die Messwerte mit Abschnittskontrolle (mit SC). Die zulässige Höchstgeschwindigkeit (Limit) ist in Form einer roten Linie in Abbildung 5.22 enthalten. Das Einfahrtsportal der Anlage zur Abschnittskontrolle befindet sich bei Streckenkilometer 13,67 und das Ausfahrtsportal bei Streckenkilometer 11,47. Die Abbildung 5.22 enthält neben den Messdaten ein Schema des Streckenabschnitts. Ergänzende Erläuterungen zu den Elementen dieses Schemas finden sich im Anhang E.

Am Anfang des Streckenabschnitts wurden die Messwerte beider Untersuchungsphasen nicht an den identischen Messorten gewonnen, weil sich der geplante Standort des Einfahrtsportals nach der Untersuchungsphase 1 nochmal änderte. Da in der Untersuchungsphase 4 zusätzlich die Trackingradarsensoren an den Portalen verfügbar waren, konnten im Bereich des Ausfahrtsportals in der Untersuchungsphase 4 mehr Messorte untersucht werden als in der Untersuchungsphase 1. Wie für die vorangegangenen Untersuchungsphasen, so gilt auch für die Untersuchungsphase 4, dass Geschwindigkeitsunterschiede größer 2 km/h signifikant sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %). Die Stichprobenumfänge betragen für die beiden Untersuchungsphasen 1 und 4 zwischen 300 und 3100 Fahrzeuge je Fahrspur.

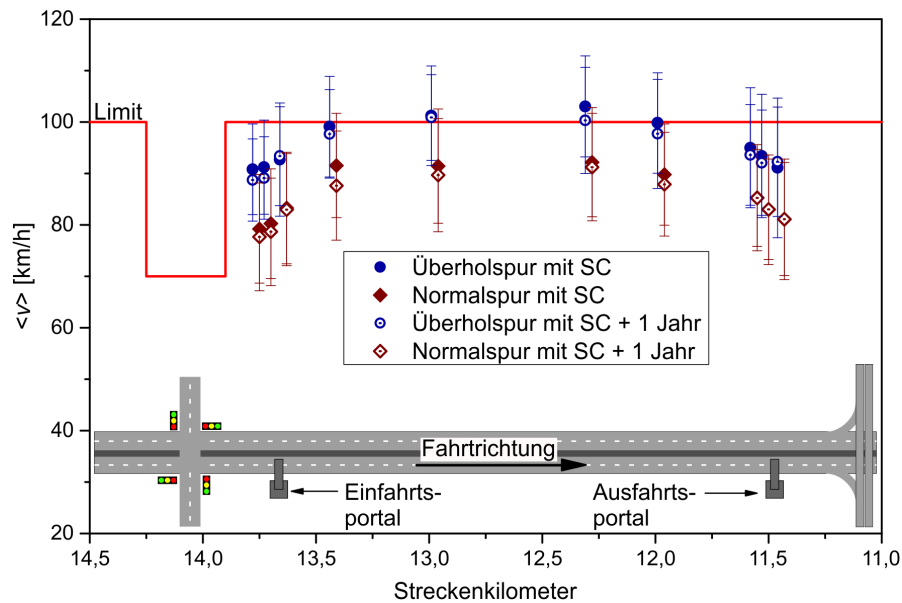
Der Abbildung 5.22 ist zu entnehmen, dass sich die mittleren Geschwindigkeiten der beiden Untersuchungsphasen im ersten Teil des Streckenabschnitts (Streckenkilometer 14,00 bis 13,00) nicht signifikant unterscheiden. Im zweiten Teil des Streckenabschnitts sind hingegen signifikante Unterschiede zwischen beiden Untersuchungsphasen in den mittleren Geschwindigkeiten der Überholspur zu verzeichnen. Diese betragen ca. –2 km/h bis



**Abbildung 5.22.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der B6 bei Hannover in der Fahrtrichtung Hannover für die Untersuchungsphasen 1 und 4. Zur Untersuchungsphase 1 gehören die Messwerte ohne Abschnittskontrolle (ohne SC) und zur Untersuchungsphase 4 gehören die Messwerte mit Abschnittskontrolle (mit SC). Das Einfahrtsportal der Abschnittskontrolle befindet sich bei Streckenkilometer 13,67 und das Ausfahrtsportal bei Streckenkilometer 11,47. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Die hier dargestellten Daten der Phase 4 wurden kurze Zeit nach der ersten Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle aufgezeichnet.

–5 km/h. Für die Normalspur trifft dies nur im Bereich des Ausfahrtsportals zu. Dort liegt die mittlere Geschwindigkeit der Untersuchungsphase 4 ca. –3 km/h unter der mittleren Geschwindigkeit der Untersuchungsphase 1. Da der einzige Unterschied zwischen beiden Untersuchungsphasen in der Erbauung und Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle besteht, kann somit geschlossen werden, dass die Abschnittskontrolle im zweiten Teil des Streckenabschnitts das Geschwindigkeitsprofil der Überholspur und am Ausfahrtsportal auch das Geschwindigkeitsprofil der Normalspur signifikant absenkt. Ein signifikanter Einfluss auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten und die mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den beiden Fahrspuren zeigt sich hier nicht.

In der Untersuchungsphase 4 wurden auch ein Jahr nach der Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle Verkehrsflussmessungen durchgeführt. In Abbildung 5.23 werden die dabei gewonnenen mittleren Geschwindigkeiten den Werten, die zu Beginn der Phase 4 ermittelt worden, gegenüber gestellt. Der Vergleich der beiden Messreihen zeigt, dass mit fortschreitender Zeit die geschwindigkeitssenkende Wirkung der Abschnittskontrolle teilweise zugenommen hat. In der Nähe des Einfahrtsportals zeigen sich sowohl auf der

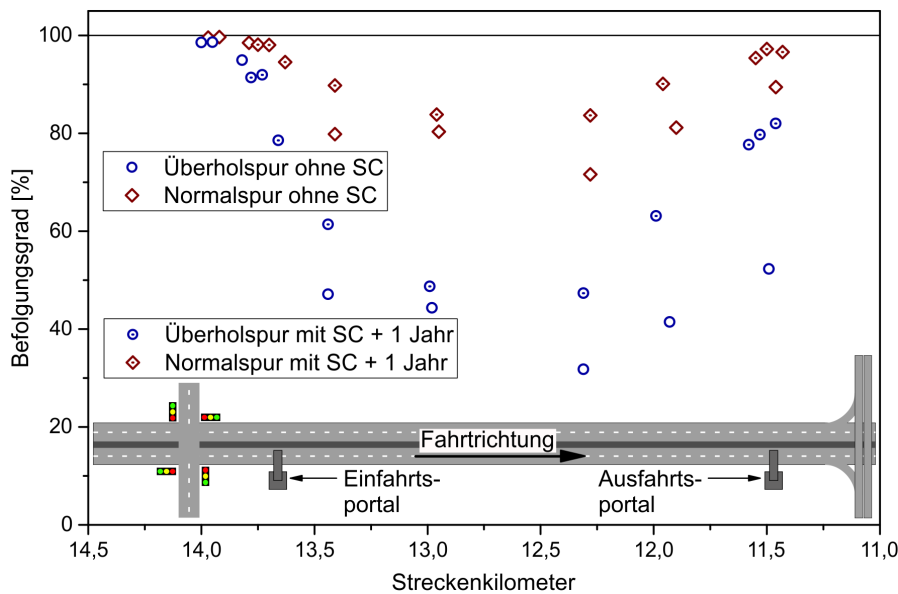


**Abbildung 5.23.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der B6 bei Hannover in der Fahrtrichtung Hannover für die Untersuchungsphase 4. Die Messdaten der Reihe „mit SC“ wurden kurze Zeit nach der ersten Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle aufgezeichnet. Die Messdaten der Reihe „mit SC + 1 Jahr“ wurden 1 Jahr nach der Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle aufgezeichnet. Das Einfahrtsportal der Abschnittskontrolle befindet sich bei Streckenkilometer 13,67 und das Ausfahrtsportal bei Streckenkilometer 11,47. Die Geschwindigkeitsmittelwerte basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren.

Normalspur als auch auf der Überholspur signifikante Reduktionen in der mittleren Geschwindigkeit von ca.  $-2$  km/h. In der Mitte des Streckenabschnitts (Streckenkilometer 13,00 bis 12,00) sind ebenfalls für beide Fahrspuren teilweise signifikante Geschwindigkeitsreduktionen von ca.  $-2$  km/h beobachtbar. In der Nähe des Ausfahrtsportals zeigen sich zwischen beiden Messreihen hingegen keine signifikanten Unterschiede in den mittleren Geschwindigkeiten.

Betrachtet man statt der mittleren Geschwindigkeit den Befolgungsgrad an den verschiedenen Messorten des Streckenabschnitts, so wird der Einfluss der Abschnittskontrolle viel deutlicher sichtbar als bei der Betrachtung der mittleren Geschwindigkeiten. Als Befolgungsgrad wird wie in der Untersuchungsphase 1 der Anteil der Fahrzeuge bezeichnet, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h nicht überschritten. Auf Grund der fehlenden Fahrzeugklassifizierung entspricht der Befolgungsgrad der Normalspur nicht exakt dem realen Wert. In Abbildung 5.24 wird der Verlauf des Befolgungsgrades dargestellt. Darin ist gut zu erkennen, dass die Befolgungsgrade beider Fahrspuren für den Fall mit Abschnittskontrolle signifikant über den Werten des Falls ohne Abschnittskontrolle liegen – ausgenommen die Werte in der Nähe des Einfahrtsportals. Die Reduzierung





**Abbildung 5.24.:** Verlauf des Befolgungsgrades für den Streckenabschnitt der B6 bei Hannover in der Fahrtrichtung Hannover für die Untersuchungsphasen 1 und 4. Zur Untersuchungsphase 1 gehören die Messwerte ohne Abschnittskontrolle (ohne SC) und zur Untersuchungsphase 4 gehören die Messwerte mit Abschnittskontrolle (mit SC + 1 Jahr). Das Einfahrtsportal der Abschnittskontrolle befindet sich bei Streckenkilometer 13,67 und das Ausfahrtsportal bei Streckenkilometer 11,47. Die Befolgungsgrade basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Die hier dargestellten Daten der Phase 4 wurden 1 Jahr nach der Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle aufgezeichnet.

der mittleren Geschwindigkeiten von  $-2$  km/h bis  $-5$  km/h führt zu deutlichen Befolgungsgraderhöhungen von etwa  $+10$  Prozentpunkten bis  $+30$  Prozentpunkten. Anhand der Abbildungen 5.22, 5.23 und 5.24 kann der Anlage zur Abschnittskontrolle ein Wirkungsbereich von ca.  $2,0$  km zugesprochen werden. Die Wirkung der Abschnittskontrolle äußert sich in signifikant reduzierten mittleren Geschwindigkeiten und signifikant erhöhten Befolgungsgraden für die geltende Höchstgeschwindigkeit.

Im Folgenden sollen die Fahrmanöver der Fahrzeugführer auf dem gesamten Streckenabschnitt betrachtet werden. Die Häufigkeiten von Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern betragen an den meisten Messorten jeweils etwa  $50\%$ . Dies trifft nicht auf die Messorte an den Portalen und den Messort bei Streckenkilometer 13,45 zu. In der Zu- und Abfahrt des Einfahrtsportals und bei Streckenkilometer 13,45 treten bevorzugt Beschleunigungsmanöver auf, weil viele der Fahrzeugführer auf Grund der Lichtzeichenanlage noch nicht ihre Wunschgeschwindigkeit erreicht haben. In der Untersuchungsphase 1 konnte in diesem Bereich des Streckenabschnitts ebenfalls festgestellt werden, dass dort bevorzugt Beschleunigungsmanöver stattfinden. Diese Fahrmanöver sind daher nicht auf die Abschnittskontrolle zurückzuführen. In der Zufahrt des Ausfahrtsportals traten bevorzugt

Klasse	1Z	2Z	3Z	4Z	5Z	6Z
Zufahrt	49,0	6,0	17,3	7,0	0,7	20,0
Klasse	1A	2A	3A	4A	5A	6A
Abfahrt	26,0	1,9	8,0	12,2	3,5	48,4

**Tabelle 5.14.:** Verteilung der Fahrzeugführer auf der Überholspur in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt und Abfahrt des Ausfahrtsportals (Phase 4).

Verzögerungsmanöver und in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver auf. Diese Fahrmanöver waren in der Untersuchungsphase 1 nicht zu beobachten. Die Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver in der unmittelbaren Umgebung zum Ausfahrtsportal sind daher eindeutig eine Folge der Abschnittskontrolle. Diese Fahrmanöver erinnern an die punktuelle Überwachung. Die resultierenden Geschwindigkeitsreduzierungen der Zufahrt betragen im Mittel ca.  $-2$  km/h und die Geschwindigkeitserhöhungen der Abfahrt ca.  $+1$  km/h. Die mittleren Verzögerungen und mittleren Beschleunigungen betragen dementsprechend ca.  $\pm 0,1$  m/s<sup>2</sup> bis  $\pm 0,2$  m/s<sup>2</sup>. Diese Werte änderten sich während der Laufzeit der Phase 4 – also über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr – nicht. Es scheint, dass ein Teil der Fahrzeugführer das Überwachungskonzept der Abschnittskontrolle noch nicht verstanden hat bzw. nicht wusste, dass es sich um eine Abschnittskontrolle handelt, und sich deshalb ähnlich verhält wie in einer punktuellen Überwachungssituation.

In der Tabelle 5.14 sind die relativen Häufigkeiten der unterschiedlichen Fahrmanöverklassen für die Zufahrt und die Abfahrt der Überholspur des Ausfahrtsportals aufgelistet worden. Dieser Tabelle kann entnommen werden, dass in der Zufahrt 72,3 % der Fahrzeugführer ihre Geschwindigkeit reduzieren (1Z + 2Z + 3Z). In der Abfahrt hingegen beschleunigen 64,1 % der Fahrzeugführer (4A + 5A + 6A). Es ist bemerkenswert, dass in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver stattfinden, da sich am Ende der Abfahrt, in ca. 50 m Entfernung hinter dem Ausfahrtsportal, Einrichtungen zur Heck- und Frontfotografie befinden, von denen ein gewisser Überwachungsdruck ausgeht. Vermutlich führen genau diese Fotoeinrichtungen dazu, dass die Geschwindigkeitserhöhungen in der Abfahrt des Ausfahrtsportals (ca.  $+1$  km/h) betragsmäßig im Mittel kleiner sind als die entsprechenden Geschwindigkeitsreduzierungen in der Zufahrt des Ausfahrtsportals (ca.  $-2$  km/h).

Da in der Zufahrt des Ausfahrtsportals auf beiden Fahrspuren bevorzugt Verzögerungsmanöver auftreten, soll im Folgenden speziell in diesem Bereich die Verkehrssicherheit mit Hilfe von SSM betrachtet werden. Die Untersuchung der SSM beschränkte sich aber nicht nur auf die Zufahrt des Ausfahrtsportals, sondern fand an allen Messorten des Streckenabschnitts statt. Die Betrachtung der SSM beginnt mit den kritischen Verzögerungsmanövern (MBV).

Für alle Untersuchungstage der Phase 4 konnten nur sieben Fahrzeuge mit einer MBV  $> 3,1 \text{ m/s}^2$  gefunden werden. Zwei dieser Fahrzeuge führten in der Zufahrt des Ausfahrtsportals und zwei weitere Fahrzeuge in der Abfahrt des Ausfahrtsportals jeweils ein kritisches Verzögerungsmanöver durch. Die anderen drei Fahrzeuge führten bei Streckenkilometer 12,00 bzw. 13,00 ein solches kritisches Verzögerungsmanöver durch. Die beiden kritischen Verzögerungsmanöver in der Zufahrt des Ausfahrtsportals besitzen, bezogen auf die Gesamtheit aller Fahrmanöver, einen relativen Anteil von 0,4 %. Die anderen kritischen Verzögerungsmanöver führten nur zu entsprechenden Werten von 0,04 % bzw. 0,06 %. An allen anderen Messorten traten keine kritischen Verzögerungsmanöver auf. In der Untersuchungsphase 1 konnte nur ein Fahrzeug mit einem kritischen Verzögerungsmanöver beobachtet werden, dieses fand bei Streckenkilometer 13,00 auf der Normalspur statt (0,03 %). Auf Grund der vorliegenden Stichprobenumfänge unterscheiden sich die gefundenen Häufigkeiten nicht signifikant. Es gilt daher, dass zwischen den Untersuchungsphasen 1 und 4 kein signifikanter Unterschied bezüglich des Auftretens kritischer Verzögerungsmanöver besteht. Das heißt, die gefundenen kritischen Verzögerungsmanöver in der unmittelbaren Umgebung zum Ausfahrtsportal können nicht zweifelsfrei der Abschnittskontrolle zugeschrieben werden. Die Einführung der Abschnittskontrolle im Testbetrieb hat somit keinen nachweisbaren Einfluss auf die Häufigkeit kritischer Verzögerungsmanöver. Im Folgenden wird untersucht, ob die Fahrmanöver auf dem Streckenabschnitt und in der unmittelbaren Umgebung des Ausfahrtsportals Einfluss auf die Häufigkeit kritischer Kollisionssituationen haben. Dies wird mit Hilfe der TTC untersucht.

Die relative Häufigkeit kritischer TTCs betrug an allen Untersuchungsorten der Phase 4 maximal 1,7 %. In den Untersuchungsphasen 1 bis 3 konnten Maximalwerte für den Anteil kritischer TTC von 0,7 % bzw. 0,5 % gefunden werden. Die relativen Häufigkeiten kritischer TTCs der Untersuchungsphase 4 sind somit tendenziell etwas größer als in den vorhergehenden Untersuchungsphasen. Auf Grund der geringen Anzahl von Fahrzeugen mit einer THW  $\leq 6 \text{ s}$  ist dieser Unterschied aber nicht signifikant. Es kann daher geschlossen werden, dass die Einführung der Abschnittskontrolle im Testbetrieb die Häufigkeiten kritischer Kollisionssituationen auf dem gesamten Streckenabschnitt nicht beeinflusst. Auch die Verzögerungsmanöver in der Zu- und Abfahrt des Ausfahrtsportals, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver, haben keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge.

Zum Abschluss dieses Abschnitts wurde noch die Häufigkeit kritischer THWs ( $\leq 1 \text{ s}$ ) auf dem durch die Abschnittskontrolle im Testbetrieb überwachten Streckenabschnitt betrachtet. Die relativen Häufigkeiten betrugen im Bezug auf die Anzahl der Fahrzeuge mit einer THW  $\leq 6 \text{ s}$  zwischen 3 % und 18 %. Im Vergleich zu den relativen Häufigkeiten aus der Untersuchungsphase 1 (3 % bis 16 %) und den Untersuchungsphasen 2 und 3 (3 % bis 14 %) zeigt die Phase 4 keine signifikant anderen Häufigkeiten. Der Abschnittskontrolle kann daher kein Einfluss auf die Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen zugesprochen werden. Dies gilt für den gesamten überwachten Streckenabschnitt.

### Fazit

Die Ergebnisse dieses Abschnitts haben im Bezug auf die Forschungsfrage 1 (Betrachtung der Fahrmanöver) gezeigt, dass die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle dazu führt, dass die Fahrzeugführer auf dem gesamten Streckenabschnitt signifikant weniger häufig Geschwindigkeitsübertretungen begehen. Die Einführung der Abschnittskontrolle hatte zur Folge, dass die Fahrzeugführer in der Zufahrt zum Ausfahrtsportal bevorzugt Verzögerungsmanöver durchführen und in der Abfahrt des Ausfahrtsportals bevorzugt Beschleunigungsmanöver. Die dabei auftretenden mittleren Verzögerungen und Beschleunigungen waren tendenziell etwas kleiner als bei der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung.

Die beobachteten Fahrmanöver hatten die Folge, dass die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses auf dem gesamten Streckenabschnitt mit Hilfe der im Testbetrieb befindlichen Abschnittskontrolle um ca.  $-2$  km/h bis  $-5$  km/h gesenkt wurde (Forschungsfrage 2). Im Gegensatz zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte für die Abschnittskontrolle nicht festgestellt werden, dass diese kritische Verzögerungsmanöver zur Folge hat (Forschungsfrage 3). Es wurden auf der mittels Abschnittskontrolle überwachten Strecke keine Häufungen kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen gefunden (Forschungsfrage 4).

Die auf dem gesamten Streckenabschnitt reduzierte mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses lässt den Schluss zu, dass die Verkehrssicherheit mit Hilfe der im Testbetrieb befindlichen Abschnittskontrolle auf dem gesamten Abschnitt der B6 erhöht wird (Forschungsfrage 5).

### 5.3.4. Zusammenfassung (B6)

Die Verkehrsflussmessungen auf der B6 bei Hannover dienten der Untersuchung des Einflusses der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung und der Abschnittskontrolle auf den Verkehr, um die Forschungsfragen 1 bis 5 des Themenschwerpunkts I und die Forschungsfragen 8 und 9 des Themenschwerpunkts III beantworten zu können. In den vorhergehenden Abschnitten fand die Beantwortung dieser Forschungsfragen bereits teilweise im verkürzten Umfang statt. In diesem Abschnitt werden nun noch einmal ausführliche Antworten gegeben.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 1:** *Welche Fahrmanöver sind in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu beobachten und mit welchen Häufigkeiten treten die einzelnen Fahrmanöver auf?*

Die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung führt auf der B6 bei Hannover dazu, dass die Fahrzeugführer in der Zufahrt zum Überwachungsort bevorzugt verzögern. Insgesamt belief sich der Anteil der Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver auf ca. 75 %. Dieser Wert ist vergleichbar mit den von der A1 und der A2 bekannten Häufig-

keiten und passt auch zu den Umfrageergebnissen. Von den Fahrzeugführern verzögerten in der Zufahrt insgesamt ca. 35 % unnötigerweise – bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit. Unter Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit fällt dieser Wert auf der B6 etwas niedriger aus als auf der A1 und der A2. Es findet sich aber eine gute Übereinstimmung mit der relativen Häufigkeit unnötiger Bremsmanöver, die in den Umfrageergebnissen festgestellt wurde (ca. 33 %), obwohl die Umfrageergebnisse nur für Streckenabschnitte mit WVA auf unnötige Verzögerungsmanöver hindeuteten.

Im Falle der angekündigten punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung betrug der Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt mit ca. 70 % etwas weniger als im unangekündigten Fall. Der Anteil der unnötigen Verzögerungsmanöver war im angekündigten Fall aber deutlich größer (ca. 55 %), weil viele Fahrzeugführer bereits hinter dem Hinweisschild beginnen ihre Geschwindigkeit zu reduzieren.

Die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle führt auf der B6 bei Hannover dazu, dass die Fahrzeugführer auf dem gesamten Streckenabschnitt signifikant weniger häufig Geschwindigkeitsübertretungen begehen. Der Befolgungsgrad stieg mit Einführung der Abschnittskontrolle um etwa +10 bis +30 Prozentpunkte. In der Zufahrt zum Ausfahrtsportal werden von den Fahrzeugführern bevorzugt Verzögerungsmanöver durchgeführt und in der Abfahrt des Ausfahrtsportals bevorzugt Beschleunigungsmanöver. Der Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt betrug ca. 70 % an der Gesamtheit und der Anteil der Beschleunigungsmanöver in der Abfahrt ca. 65 %. Der Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt zum Ausfahrtsportal ist damit ähnlich zu den Werten bei der punktuellen Überwachung. Daraus wurde geschlossen, dass zum Zeitpunkt der Phase 4 noch nicht alle Fahrzeugführer das Überwachungskonzept der Abschnittskontrolle verstanden hatten bzw. noch nicht wussten, dass es sich um eine Abschnittskontrolle handelte.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 2:** *Welche Änderungen im Verkehrsfluss sind in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort ( $\pm 100$  m) feststellbar?*

Die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses auf der B6 bei Hannover wird von der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf beiden Fahrspuren lokal um ca.  $-7$  km/h abgesenkt. Unter Zuhilfenahme eines Hinweisschildes wurde diese Absenkung auf ca.  $-12$  km/h erhöht. In der Zufahrt zum Überwachungsort betrug die mittlere Geschwindigkeitsreduktion ca.  $-1$  km/h bis  $-2$  km/h.

Beim Einsatz der Abschnittskontrolle erfolgte die Absenkung der mittleren Geschwindigkeit auf dem gesamten Streckenabschnitt um ca.  $-2$  km/h bis  $-5$  km/h, wobei sich die Wirkung mit fortschreitender Versuchszeit über einen Zeitraum von einem Jahr erhöhte. Die in der unmittelbaren Umgebung zum Ausfahrtsportal durchgeführten Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver führten zu mittleren Änderungen von ca.  $-2$  km/h bzw. ca.  $+1$  km/h in den Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Ein signifikanter Einfluss der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung bzw. der im Testbetrieb befindlichen Abschnittskontrolle auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten einer jeden Fahrspur und die mittleren Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den beiden Fahrspuren konnte hier nicht nachgewiesen werden.

Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte anhand der Reduzierungen der mittleren Geschwindigkeit hier auf der B6 bei Hannover mit ca. 0,4 km abgeschätzt werden. Beim Einsatz des Hinweisschildes erhöhte sich dieser Schätzwert auf ca. 0,5 km. Die Abschnittskontrolle hingegen besitzt einen Wirkungsbereich von ca. 2,0 km.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 3:** *Hat die Geschwindigkeitsüberwachung kritische Verzögerungsmanöver zur Folge?*

Die auf Grund der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung durchgeführten Verzögerungsmanöver wurden im Mittel mit Verzögerungen von ca.  $-0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $-0,5 \text{ m/s}^2$  durchgeführt. Diese Werte sind vergleichbar mit den Werten von der A1 und der A2. Die Verwendung des Hinweisschildes führte nicht zu einer Veränderung dieser Werte.

Vereinzelte traten bei der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung kritische Verzögerungsmanöver auf. Deren Häufigkeit im Bezug auf die Gesamtheit aller Fahrmanöver betrug im Fall der unangekündigten Überwachung maximal 2,5 %. Weil im Fall ohne Überwachung am Untersuchungsort keine kritischen Verzögerungsmanöver zu beobachten waren, wurde nachgewiesen, dass die kritischen Verzögerungsmanöver tatsächlich eine Folge der punktuellen Überwachung sind. Der genannte Prozentwert ist signifikant größer als die bekannten Werte von der A1 (maximal 0,4 %) und der A2 (maximal 0,8 %). Als Ursache hierfür ist vermutlich die Tatsache zu nennen, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung auf der B6 bei Hannover schlechter für die Fahrzeugführer vorhersehbar ist, weil diese immer nur zeitweise betrieben wird. Die stationären Überwachungsgeräte auf der A1 und der A2 überwachen die Geschwindigkeit hingegen rund um die Uhr.

Mit Hilfe des Hinweisschildes wurde die Häufigkeit der kritischen Verzögerungsmanöver bei der punktuellen Überwachung signifikant auf 0,7 % (Maximalwert) gesenkt. Dieser Wert befindet sich damit auf dem Niveau der von der A1 und der A2 bekannten Maximalwerte. Das heißt, das Hinweisschild verhindert kritische Verzögerungsmanöver, indem es die Überwachungssituation besser vorhersehbar macht. Dies stützt die oben geäußerte Vermutung und ist in Übereinstimmung mit den Umfrageergebnissen.

Die Einführung der Abschnittskontrolle änderte nicht die relativen Häufigkeiten für das Auftreten von Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern an den unterschiedlichen Messorten des Streckenabschnitts. Nur in der unmittelbaren Umgebung zum Ausfahrtsportal konnte festgestellt werden, dass mit der Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle sich dort die Häufigkeiten von Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern änderten.

In der Zufahrt zum Ausfahrtsportal bevorzugen die Fahrzeugführer Verzögerungsmanöver und in der Abfahrt Beschleunigungsmanöver. Die dabei auftretenden mittleren Verzögerungen und Beschleunigungen betrugen im Mittel ca.  $0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $0,2 \text{ m/s}^2$ . Ein signifikanter Einfluss der im Testbetrieb befindlichen Abschnittskontrolle auf die relative Häufigkeit kritischer Verzögerungsmanöver konnte aber nicht festgestellt werden, so dass der Abschnittskontrolle keine kritischen Verzögerungsmanöver zuzuschreiben waren.

In einer Veröffentlichung über die Abschnittskontrolle in Norwegen wurde gezeigt, dass in den Zu- und Abfahrten von Einfahrts- und Ausfahrtsportal Geschwindigkeitsreduzierungen bzw. -erhöhungen durchgeführt werden [Rag11]. Diese Veröffentlichung bestätigt damit den hier für das Ausfahrtsportal gefundenen Effekt.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 4:** *Führen die Fahrmanöver in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu einer Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisionssituationen?*

Der relative Anteil kritischer Kollisionssituationen betrug am Ort der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf der B6 bei Hannover maximal 0,5 % an der Gesamtheit aller Nachfahrtsituationen. Dieser Prozentwert war unabhängig davon, ob die Geschwindigkeitsüberwachung stattfand oder nicht.

Kritische Auffahrsituationen traten am häufigsten auf der Überholspur auf. Die Ursache für diesen Effekt lag teilweise in den kleineren Fahrzeugabständen und teilweise in den höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten auf der Überholspur. Der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte aber kein Einfluss auf die Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen zugeschrieben werden.

Das heißt insgesamt, dass die Fahrmanöver in der Zufahrt des punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes, insbesondere die kritischen Verzögerungsmanöver, keine Häufungen kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen zur Folge haben. Diese Erkenntnis war unabhängig davon, ob die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung mit einem Hinweisschild angekündigt wurde oder nicht.

Für die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle auf der B6 bei Hannover ließ sich zeigen, dass diese weder die Häufigkeit kritischer Kollisionssituationen noch die Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen signifikant beeinflusst. Es wurde somit geschlussfolgert, dass die Fahrmanöver auf der mittels Abschnittskontrolle überwachten Strecke keine Häufungen kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen zur Folge haben.

**Erkenntnisse zur Forschungsfrage 5:** *Welche Schlussfolgerungen können anhand der Fahrmanöver und der Änderungen des Verkehrsflusses bezüglich der Verkehrssicherheit gezogen werden?*

Die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung führte zu einer Reduzierung der mittleren Geschwindigkeiten des Verkehrsflusses auf beiden Fahrspuren. Am Ort der punktuellen Überwachung waren zudem keine Häufungen kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen zu beobachten. Es kann an dieser Stelle daher der Schluss gezogen werden, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung auf der B6 bei Hannover die Verkehrssicherheit erhöht.

Mit Hilfe eines Hinweisschildes kann diese verkehrssichernde Wirkung erhöht werden, weil sich dann der abgeschätzte Wirkungsbereich ausdehnt und die mittleren Geschwindigkeiten weiter gesenkt werden. Der Einsatz eines Hinweisschildes bringt außerdem den positiven Nebeneffekt, dass damit dem Auftreten von kritischen Verzögerungsmanövern entgegengewirkt wird.

Die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle senkt die mittleren Geschwindigkeiten des Verkehrsflusses auf dem gesamten Streckenabschnitt. Die Abschnittskontrolle zieht zudem keine kritischen Verzögerungsmanöver nach sich und führt auch nicht zu einer Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisionssituationen. Auf Grund dieser Ergebnisse kann bezüglich der Forschungsfrage 5 geantwortet werden, dass die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle auf der B6 bei Hannover verkehrssichernd wirkt.

**Erkenntnisse zur Forschungsfragen 8:** *Lassen sich die beiden aus dem Ausland bekannten Vorteile der Abschnittskontrolle auch für die Pilot-Anlage hier in Deutschland messtechnisch nachweisen?*

**und zur Forschungsfrage 9:** *Unter welchen Randbedingungen ist die Abschnittskontrolle für die Erhöhung der Verkehrssicherheit besser geeignet als eine punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung?*

Die in diesem Abschnitt präsentierten Untersuchungen ermöglichen den direkten Vergleich zwischen den Wirkungen der punktuellen Überwachung und der Abschnittskontrolle auf den Verkehr. Dieser wird im Folgenden – vor dem Hintergrund der Forschungsfragen 8 und 9 – durchgeführt.

Beide Überwachungsmethoden führen zu einer Reduzierung der mittleren Geschwindigkeiten und sind damit jeweils mit Erhöhungen des Befolungsgrades verbunden. Die Beträge der mittleren Geschwindigkeitsreduzierungen und der Befolungsgraderhöhungen unterscheiden sich allerdings zwischen beiden Überwachungsmethoden. Die Werte zeigen, dass die mittleren Geschwindigkeitsreduzierungen, die auf die Abschnittskontrolle zurückzuführen sind (ca.  $-2$  km/h bis  $-5$  km/h), betragsmäßig kleiner sind als bei der unangekündigten (ca.  $-7$  km/h) und angekündigten (ca.  $-12$  km/h) punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung. Demzufolge betrug die Befolungsgraderhöhung im Fall der Abschnittskontrolle (ca.  $+10$  bis  $+30$  Prozentpunkte) teilweise auch etwas weniger als bei der punktuellen Überwachung (ca.  $+10$  bis  $+40$  Prozentpunkte).



Der Vorteil der punktuellen Überwachung gegenüber der Abschnittskontrolle liegt somit darin, dass die geschwindigkeitssenkende Wirkung lokal stärker ausgeprägt ist. Die Abschnittskontrolle hat hingegen den Vorteil, dass sich ihre Wirkung über einen größeren Bereich erstreckt. Für die punktuelle Überwachung konnte selbst mit Hinweisschild der Wirkungsbereich mit maximal ca. 0,5 km abgeschätzt werden. Im Falle der Abschnittskontrolle betrug der Wirkungsbereich ca. 2,0 km. Es ist davon auszugehen, dass der Wirkungsbereich der Abschnittskontrolle mit wachsendem Abstand zwischen Einfahrts- und Ausfahrtsportal weiter zunimmt und mit Hilfe von Hinweisschildern zusätzlich ausgedehnt werden kann.

Weder für die Abschnittskontrolle noch für die punktuelle Überwachung konnte ein Einfluss auf die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Fahrspuren bzw. die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten nachgewiesen werden.

Der Vergleich zwischen der punktuellen Überwachung und der Abschnittskontrolle zeigt weiterhin, dass es bei beiden Überwachungsmethoden Bereiche gibt, in denen die Fahrzeugführer bevorzugt Verzögerungsmanöver durchführen. Im Falle der punktuellen Überwachung befindet sich dieser Bereich in der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes. Bei der Abschnittskontrolle hingegen finden bevorzugt Verzögerungsmanöver am Ende des überwachten Streckenabschnitts in der Zufahrt des Ausfahrtsportals statt. Der Anteil der Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit der Fahrmanöver beträgt in beiden Fällen ca. 70 % bis 75 %. Im Vergleich zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung fallen die mittleren Verzögerungswerte bei der Abschnittskontrolle aber kleiner aus. Außerdem können der Abschnittskontrolle – im Gegensatz zur punktuellen Überwachung – keine kritischen Verzögerungsmanöver zugeschrieben werden. Es sei aber angemerkt, dass bei beiden Überwachungsmethoden keine Häufungen kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen festzustellen waren.

Bezüglich der Forschungsfrage 8 kann an dieser Stelle damit zusammengefasst werden, dass die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle auf der B6 bei Hannover gegenüber der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung die beiden aus dem Ausland bekannten Vorteile, Ausdehnung des Überwachungsdrucks auf den gesamten Abschnitt und Minimierung von Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern, zeigt.

Für die Forschungsfrage 9 folgt daraus, dass sich die Abschnittskontrolle im Vergleich zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung dann besser für die Erhöhung der Verkehrssicherheit eignet, wenn ein kompletter Streckenabschnitt befriedet werden soll. Denn um die Verkehrssicherheit eines Streckenabschnitts mit Hilfe der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf der gesamten Länge des Abschnitts zu verbessern, ist ein großer Aufwand vonnöten. Selbst bei einer linienhaften Anordnung mehrerer punktueller Überwachungsgeräte hintereinander wirkt der Überwachungsdruck jeweils nur lokal (siehe auch [Lip12]). Diese Limitierung kann mit Hilfe der Abschnittskontrolle behoben werden.

Auf Grund der in diesem Abschnitt festgestellten Vorteile der Abschnittskontrolle eignet sich diese außerdem ideal dafür, um auf einem Streckenabschnitt mit WVA die zulässige Höchstgeschwindigkeit unter den Fahrzeugführern durchzusetzen.

## 6. Zusammenfassung der Erkenntnisse

Das übergeordnete Ziel dieser Dissertation war die Untersuchung von Fahrmanövern in Geschwindigkeitsüberwachungssituationen. Mit Hilfe dieser Untersuchungen wurden neue Erkenntnisse generiert, die im Rahmen zukünftiger Verkehrssicherheitsprojekte für die Erhöhung der aktuell bestehenden Verkehrssicherheit genutzt werden können.

Für die Untersuchungen der Fahrmanöver wurden zwei sehr verschiedene Geschwindigkeitsüberwachungssituationen betrachtet – die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung und die Abschnittskontrolle. Für die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung bestand teilweise die Besonderheit, dass die Überwachungsgeräte auf den untersuchten Streckenabschnitten in Kombination mit Streckenbeeinflussungsanlagen (WVA) betrieben wurden. Bei der untersuchten Abschnittskontrolle handelte es sich um die Pilot-Anlage des Landes Niedersachsen, welche die erste Abschnittskontrolle in Deutschland darstellt.

Die Erarbeitung der neuen Erkenntnisse erfolgte anhand von insgesamt 9 Forschungsfragen, welche in drei Themenschwerpunkte aufgeteilt wurden. Der Themenschwerpunkt I befasste sich mit den Fahrmanövern, dem Verkehrsfluss und der Verkehrssicherheit in den beiden Geschwindigkeitsüberwachungssituationen (Forschungsfragen 1 bis 5). Zum Themenschwerpunkt II, der die kombinierte Wirkung von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA auf die Verkehrssicherheit betrachtete, zählten die Forschungsfragen 6 und 7. Der Themenschwerpunkt III diente schließlich dem Vergleich der Abschnittskontrolle in Deutschland mit den Anlagen des Auslands und der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung bezüglich der Wirkungen auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit (Forschungsfragen 8 und 9).

Im Folgenden werden die zu diesen Forschungsfragen gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt. Die anhand dieser Erkenntnisse abgeleiteten Empfehlungen für zukünftige Verkehrssicherheitsprojekte werden dann im nächsten Kapitel präsentiert (siehe Kapitel 7).

**Forschungsfrage 1:** *Welche Fahrmanöver sind in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu beobachten und mit welchen Häufigkeiten treten die einzelnen Fahrmanöver auf?*

Im Falle der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung treten in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort Verzögerungsmanöver und anschließende Beschleunigungsmanöver auf. Der relative Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt zum Überwachungsort beträgt dabei meist zwischen ca. 70 % und ca. 80 %. In der Abfahrt

beträgt der relative Anteil der Beschleunigungsmanöver meist ca. 80 %. Es zeigte sich für diese Prozentwerte kaum eine Abhängigkeit vom Überwachungsort und von der geltenden zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Ein großer Teil der durchgeführten Verzögerungsmanöver wäre auf Grund der Fahrzeuggeschwindigkeit nicht nötig gewesen. Das heißt, die Fahrzeugführer befolgen die zulässige Höchstgeschwindigkeit und verzögern trotzdem in der Zufahrt zum Überwachungsort.

Die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle führte nur in der unmittelbaren Umgebung zum Ausfahrtsportal zu Verzögerungs- und anschließenden Beschleunigungsmanövern. An allen übrigen Messorten, insbesondere in der unmittelbaren Umgebung zum Einfahrtsportal, konnten keine Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver festgestellt werden, die auf die Abschnittskontrolle zurückzuführen sind. Der relative Anteil der Verzögerungsmanöver in der Zufahrt zum Ausfahrtsportal betrug ca. 70 % und der relative Anteil der Beschleunigungsmanöver in der Abfahrt vom Ausfahrtsportal ca. 65 %. Aus diesem Fahrverhalten ist zu schließen, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht alle Fahrzeugführer das Überwachungskonzept der Abschnittskontrolle verstanden hatten bzw. noch nicht wussten, dass es sich um eine Abschnittskontrolle handelte.

**Forschungsfrage 2:** *Welche Änderungen im Verkehrsfluss sind in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort ( $\pm 100$  m) feststellbar?*

In der Zufahrt zum Überwachungsort waren bei den punktuell arbeitenden Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten Reduzierungen in den mittleren Geschwindigkeiten von bis zu etwa  $-5$  km/h feststellbar. In den Abfahrten waren entsprechend mittlere Erhöhungen von bis zu etwa  $+4$  km/h zu beobachten. Am Überwachungsort betrug die mittlere Geschwindigkeit insgesamt ca.  $-1$  km/h bis  $-22$  km/h weniger als an Orten abseits der Überwachung. Die exakten Werte hängen vom Überwachungsort, der untersuchten Fahrspur und der zulässigen Höchstgeschwindigkeit ab.

Ein Einfluss der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten konnte an keinem der untersuchten Überwachungsorte nachgewiesen werden. Für die Autobahnen zeigte sich aber, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die Differenz der mittleren Geschwindigkeiten benachbarter Fahrspuren reduziert und somit den Verkehrsfluss harmonisiert.

Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte abhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und abhängig vom Streckenabschnitt mit ca.  $0,4$  km bis  $1,0$  km abgeschätzt werden.

Bei der Abschnittskontrolle betrugen die Änderungen der mittleren Geschwindigkeiten auf dem Streckenabschnitt ca.  $-2$  km/h bis  $-5$  km/h. In der unmittelbaren Umgebung zum Ausfahrtsportal betrug die Änderung der mittleren Geschwindigkeit in der Zufahrt ca.  $-2$  km/h und in der Abfahrt ca.  $+1$  km/h. Die Abschnittskontrolle zeigte keinen

---

Einfluss auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten. Der Wirkungsbereich der Abschnittskontrolle erstreckte sich über den gesamten Streckenabschnitt von ca. 2,0 km Länge.

Das heißt, die geschwindigkeitssenkende Wirkung der punktuellen Überwachung ist zwar lokal größer als die der Abschnittskontrolle, betrachtet man aber den gesamten Streckenabschnitt, so senkt die Abschnittskontrolle die mittlere Geschwindigkeit in einem größeren räumlichen Bereich.

**Forschungsfrage 3:** *Hat die Geschwindigkeitsüberwachung kritische Verzögerungsmanöver zur Folge?*

Die mittleren Verzögerungen in den Zufahrten der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte betrugen im Mittel ca.  $-0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $-0,5 \text{ m/s}^2$ . Das heißt, der Großteil der Fahrzeugführer verzögerte im Überwachungsfall nur moderat. In seltenen Fällen traten aber auch kritische Verzögerungsmanöver in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort auf. Wenn die Überwachungssituation für die Fahrzeugführer vorhersehbar war (z. B. Einsatz eines Hinweisschilds oder stationäre Überwachung), betrug der relative Anteil der kritischen Verzögerungsmanöver an der Gesamtheit aller Fahrmanöver weniger als 1 %. Im umgekehrten Fall (kein Hinweisschild und nur zeitweise Geschwindigkeitsüberwachung) traten die kritischen Verzögerungsmanöver am Überwachungsort signifikant häufiger auf (maximal ca. 2,5 %).

Die Fahrmanöver in der unmittelbaren Umgebung zum Ausfahrtsportal der Abschnittskontrolle wurden mit Verzögerungen bzw. Beschleunigungen von im Mittel ca.  $\pm 0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $\pm 0,2 \text{ m/s}^2$  durchgeführt. Die Abschnittskontrolle hatte keine kritischen Verzögerungsmanöver zur Folge. Für die Abschnittskontrolle ist außerdem anzunehmen, dass die Häufigkeit der Verzögerungsmanöver mit fortschreitender Betriebszeit abnimmt, weil die Fahrzeugführer das Überwachungskonzept der Abschnittskontrolle besser verstehen lernen. Dies deutete sich in den Messdaten der Untersuchungsphase 4 bereits an, konnte aber nicht statistisch sicher bestätigt werden, da die Häufigkeit kritischer Verzögerungsmanöver bereits kurze Zeit nach der ersten Inbetriebnahme der Abschnittskontrolle sehr kleine Werte annahm.

**Forschungsfrage 4:** *Führen die Fahrmanöver in einer Geschwindigkeitsüberwachungssituation zu einer Häufung von kritischen Auffahr- oder Kollisionssituationen?*

Weder die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung noch die Abschnittskontrolle führen zu einer Häufung kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen. Für die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung wurde im Rahmen einer Sonderuntersuchung auf der A2 sogar gezeigt, dass diese auf der Überholspur die Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen signifikant senkt.

**Forschungsfrage 5:** *Welche Schlussfolgerungen können anhand der Fahrmanöver und der Änderungen des Verkehrsflusses bezüglich der Verkehrssicherheit gezogen werden?*

Die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung führt zu einem lokalen Minimum der mittleren Geschwindigkeiten. Teilweise wurde an den untersuchten Überwachungsorten zudem nachgewiesen, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren und die Häufigkeiten kritischer Auffahrsituationen reduziert. Außerdem wurde festgestellt, dass die in seltenen Fällen auftretenden kritischen Verzögerungsmanöver keine Häufung kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen nach sich ziehen und somit keine negativen Konsequenzen für die Verkehrssicherheit haben. Insgesamt wird daher geschlussfolgert, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die Verkehrssicherheit lokal erhöht.

Die Messergebnisse zeigen, dass die am Überwachungsort auftretenden kritischen Situationen in der Regel nicht überkritisch werden. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit den bereits existierenden wissenschaftlichen Veröffentlichungen, wonach mittels punktueller Geschwindigkeitsüberwachung die Unfallrate und die Unfallschwere am Überwachungsort gesenkt werden und daher die Verkehrssicherheit erhöht wird (siehe Abschnitt 2.4.2). Als Ausnahme muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass es in einer von Izadpanah et al. durchgeführten Untersuchung an Kreuzungen auf Grund der Einführung von kombinierter Rotlicht- und Geschwindigkeitsüberwachung zu einem Anstieg der festgestellten Auffahrunfälle kam [Iza15].

Mit Hilfe eines Hinweisschildes wird die verkehrssichernde Wirkung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung erhöht, weil sich dann der abgeschätzte Wirkungsbereich ausdehnt und die mittleren Geschwindigkeiten weiter gesenkt werden. Der Einsatz eines Hinweisschildes bringt außerdem den positiven Nebeneffekt, dass damit dem Auftreten von kritischen Verzögerungsmanövern entgegengewirkt wird.

Die Abschnittskontrolle erhöht auch die Verkehrssicherheit, weil mit Hilfe der Abschnittskontrolle die mittleren Geschwindigkeiten auf dem gesamten Streckenabschnitt reduziert werden und die Abschnittskontrolle keine kritischen Verzögerungsmanöver zur Folge hat. Außerdem führen die Fahrmanöver auf der mittels Abschnittskontrolle überwachten Strecke nicht zu einer Häufung kritischer Auffahr- oder Kollisionssituationen.

**Forschungsfrage 6:** *Heben sich die positiven Wirkungen, die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung und WVA jeweils auf die Verkehrssicherheit haben, bei der Kombination beider Systeme auf, oder unterstützen sich beide Systeme hinsichtlich der Verkehrssicherheit?*

Sowohl die kleineren mittleren Geschwindigkeiten des Verkehrsflusses und die damit erhöhten Befolgungsgrade als auch die kleineren Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen benachbarten Fahrspuren und die reduzierten Häufigkeiten kritischer Auffahrsituationen

---

am Überwachungsort zeigen, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die verkehrssichernde Wirkung der WVA unterstützt. Die Untersuchungen dieser Arbeit haben zudem ergeben, dass diese Unterstützung unabhängig von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, das heißt unabhängig vom Stellzustand der WVA, auftritt – sofern der freie Verkehrszustand vorliegt.

**Forschungsfrage 7:** *Gibt es ein Verbesserungspotenzial bei der aktuell praktizierten Kombination von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA?*

Wenn sich das punktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsgerät am Fuße eines Anzeigequerschnitts der WVA befindet und dieser Anzeigequerschnitt eine im Vergleich zum vorherigen Anzeigequerschnitt andere zulässige Höchstgeschwindigkeit anzeigt, dann werden die Fahrzeugführer gleichzeitig mit der Überwachungssituation und der neuen Höchstgeschwindigkeit konfrontiert. In diesem Fall können unnötige kritische Verzögerungsmanöver provoziert werden. Diese sind die Folge der Verunsicherung, die unter den Fahrzeugführern auf Grund des gleichzeitigen Auftretens von Überwachung und neuer Höchstgeschwindigkeit entsteht. In diesem Punkt besteht daher ein Verbesserungspotenzial bei der aktuell praktizierten Kombination von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA.

Aus Sicht der Verkehrssicherheit unterstützt die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die WVA. Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung ist aber räumlich begrenzt, weshalb diese Unterstützung nicht für den gesamten Streckenabschnitt besteht. Die räumliche Ausdehnung des Wirkungsbereichs der punktuellen Überwachung stellt somit einen weiteren Punkt des Verbesserungspotenzials dar.

**Forschungsfrage 8:** *Lassen sich die beiden aus dem Ausland bekannten Vorteile der Abschnittskontrolle auch für die Pilot-Anlage hier in Deutschland messtechnisch nachweisen?*

Die im Testbetrieb befindliche Abschnittskontrolle auf der B6 bei Hannover zeigt bereits jetzt gegenüber der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung die beiden aus dem Ausland bekannten Vorteile, Ausdehnung des Überwachungsdrucks auf den gesamten Abschnitt und Minimierung von Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern.

**Forschungsfrage 9:** *Unter welchen Randbedingungen ist die Abschnittskontrolle für die Erhöhung der Verkehrssicherheit besser geeignet als eine punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung?*

Wenn die Verkehrssicherheit eines gesamten Streckenabschnitts erhöht werden soll, ist die Abschnittskontrolle der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung vorzuziehen. Denn selbst bei einer linienhaften Anordnung mehrerer punktueller Überwachungsgeräte hintereinander wirkt der Überwachungsdruck jeweils nur lokal (siehe auch [Lip12]). Aus diesem

Grund eignet sich die Abschnittskontrolle außerdem ideal dafür, um auf einem Streckenabschnitt mit WVA die zulässige Höchstgeschwindigkeit unter den Fahrzeugführern durchzusetzen.



## 7. Empfehlungen und Ausblick

Die mit Hilfe der Forschungsfragen erarbeiteten Erkenntnisse dieser Dissertation zum Fahrverhalten im Überwachungsfall werden hier teilweise nochmals aufgegriffen, um entsprechende Empfehlungen für zukünftige Verkehrssicherheitsprojekte abzuleiten. Diese können dazu beitragen, die aktuell bestehende Verkehrssicherheit weiter zu erhöhen.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit zeigen, dass mit Hilfe der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung die Verkehrssicherheit erhöht wird. Diese erhöhte Verkehrssicherheit erstreckt sich allerdings maximal über einen räumlichen Bereich mit einer Länge von ca. 1,0 km.

Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die Abschnittskontrolle eine gute Alternative zur punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung darstellt, weil mit Hilfe der Abschnittskontrolle die Verkehrssicherheit auf dem gesamten Streckenabschnitt zwischen Einfahrts- und Ausfahrtsportal erhöht wird.

**Empfehlung A:** *Für zukünftige Verkehrssicherheitsprojekte kann damit festgehalten werden, dass punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung idealerweise dort eingesetzt werden sollte, wo Gefahrenpunkte im Streckennetz bestehen. Soll hingegen die Verkehrssicherheit eines gesamten Streckenabschnitts erhöht werden, dann ist die Abschnittskontrolle der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung vorzuziehen.*

Mit Hilfe der Verkehrsflussmessungen auf der A1 und der A2 wurde in dieser Arbeit nachgewiesen, dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung die verkehrssichernde Wirkung der WVA unterstützt. Auf Grund des räumlich begrenzten Wirkungsbereichs der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung ist diese unterstützende Wirkung nur lokal nachweisbar und besteht nicht auf dem gesamten Streckenabschnitt der WVA.

**Empfehlung B:** *Weil die Abschnittskontrolle einen deutlich größeren räumlichen Wirkungsbereich besitzt als die punktuelle Überwachung und dieser Wirkungsbereich durch die Standortwahl von Einfahrts- und Ausfahrtsportal entsprechend eingestellt werden kann, ist es empfehlenswert, zukünftig die verkehrssichernde Wirkung einer WVA mit Hilfe der Abschnittskontrolle zu unterstützen.*

**Empfehlung C:** *Falls der Einsatz der Abschnittskontrolle nicht möglich sein sollte und nur die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung für diesen Streckenabschnitt zur Verfügung steht, empfiehlt es sich – im Sinne der Verkehrssicherheit – Maßnahmen zu ergreifen, die den räumlichen Wirkungsbereich der punktuellen Überwachung erhöhen.*

Eine dieser Maßnahmen kann darin bestehen, zusätzlich zur stationären punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auch transportable punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung zu betreiben. Transportable Überwachung birgt gegenüber stationärer Überwachung den Vorteil, dass die Überwachungssituation nicht so gut vorhersehbar ist und der Überwachungsdruck dadurch auch abseits des Überwachungsortes existiert.

Wie die Untersuchungen auf der B6 zeigen, bietet sich als weitere Maßnahme die Verwendung von Hinweisschildern an. Diese Schilder unterstützen die Wirkung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung, indem sie den räumlichen Wirkungsbereich ausdehnen, die geschwindigkeitssenkende Wirkung der Überwachung verstärken und dem Auftreten von kritischen Verzögerungsmanövern entgegenwirken.

Wenn sich das punktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsgerät am Fuße eines Anzei-gequerschnitts der WVA befindet und dieser Anzei-gequerschnitt eine neue zulässige Höchstgeschwindigkeit anzeigt, können unnötige kritische Verzögerungsmanöver provoziert werden.

**Empfehlung D:** *Es ist daher zu empfehlen, dass zukünftig die Kombination von punktueller Geschwindigkeitsüberwachung und WVA so gestaltet wird, dass die räumliche Entfernung zwischen Überwachungsort und nachfolgendem Anzei-gequerschnitt mindestens einige hundert Meter beträgt.*

Die Empfehlungen A und B legen die Verwendung der Abschnittskontrolle im Rahmen zukünftiger Verkehrssicherheitsprojekte in Deutschland nahe.

**Empfehlung E:** *Für zukünftige Projekte ist dabei zu empfehlen, dass mittels Hinweisschildern und einer entsprechenden Öffentlichkeitsarbeit den Fahrzeugführern das Überwachungskonzept der Abschnittskontrolle vermittelt wird.*

Beide Begleitmaßnahmen bieten den Vorteil, dass damit dem Auftreten von Verzögerungs- und Beschleunigungsmanövern am Einfahrts- und Ausfahrtsportal entgegengewirkt wird und somit eine weitere Verkehrsflussharmonisierung stattfindet. Zudem wird dadurch die Abschnittskontrolle leichter Akzeptanz unter den Fahrzeugführern finden.

Die Standorte von Einfahrts- und Ausfahrtsportal haben bei einer Anlage zur Abschnittskontrolle einen großen Einfluss auf den Wirkungsbereich. Damit die Abschnittskontrolle nicht nur auf dem überwachten Abschnitt die Verkehrssicherheit erhöht, sondern zusätzlich über den überwachten Streckenabschnitt hinaus wirken kann, ist es empfehlenswert, Einfahrts- und Ausfahrtsportal so zu errichten, dass vor und hinter dem überwachten Streckenabschnitt der Verkehr ungestört fließen kann.

**Empfehlung F:** *Die Standorte von Einfahrts- und Ausfahrtsportal sollten daher in der Planungsphase stets sorgfältig ausgewählt werden.*

---

## Ausblick

Vom Standpunkt der Wissenschaft aus gesehen bleibt die Frage offen, welchen Einfluss punktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf den Verkehrsfluss bei Wochenend- und Ferienverkehr haben. Diese Wirkungen gilt es zukünftig zu untersuchen. In zukünftigen Arbeiten wäre außerdem eine Fahrzeugklassifizierung und Kennzeichenerfassung wünschenswert, um die Fahrmanöver in der Zu- und Abfahrt eines Überwachungsgerätes besser verstehen zu können und zwischen ortskundigen und ortsunkundigen Fahrern unterscheiden zu können. Es bleibt außerdem unklar, welchen Einfluss die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung auf die Umweltbelastung (Abgase und Lärm) und die Kapazität eines Streckenabschnitts hat.

Bezüglich der Abschnittskontrolle in Deutschland bleibt die Frage offen, welche Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit sich im Echtbetrieb ergeben. Dabei sollte auch die Entwicklung der Unfallzahlen und der Fahrzeugemissionen berücksichtigt werden.

Neben der Abschnittskontrolle und der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung existieren in Deutschland weitere Überwachungsmaßnahmen. Weit verbreitet sind beispielsweise die Abstandsüberwachung und die Geschwindigkeitsüberwachung aus dem fließenden Verkehr heraus. Diese beiden Maßnahmen könnten zukünftig ebenfalls hinsichtlich bestehender Verbesserungspotenziale bezüglich der Verkehrssicherheit untersucht werden.



## **A. Weitere Auswertung der Verkehrsflussmessungen**

In diesem Kapitel werden die Verkehrsflussmessungen, die auf der A3 und der A71 durchgeführt wurden, vorgestellt und ausgewertet. Auf der A3 und der A71 wird punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung betrieben, jeweils in Kombination mit einer WVA. Die Verkehrsflussmessungen auf diesen beiden Streckenabschnitten liefern daher Erkenntnisse zu den Forschungsfragen dieser Arbeit im Bezug auf punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung mit Anbindung an eine WVA.

Die Konfiguration der Trackingradarsensoren bestand auf der A3 und der A71 darin, dass für jeden Sensor 4 virtuelle Triggerlinien definiert wurden, die sich jeweils in einer festgelegten Entfernung zum Sensor befanden und sich jeweils über alle vorhandenen Fahrspuren erstreckten. An diesen Triggerlinien wurden die Geschwindigkeiten und Positionen der passierenden Fahrzeuge gemessen und aufgezeichnet. Die Messdaten enthielten somit nur die an den Triggerlinien gemessenen Geschwindigkeiten und Positionen der einzelnen Fahrzeuge. Informationen über die Verfolgung (Tracking) der Fahrzeuge waren in den Messdaten nicht vorhanden. Es waren daher auch keine Informationen über die Geschwindigkeitsänderungen, Verzögerungen und Beschleunigungen einzelner Fahrzeuge verfügbar. Die Messdaten von der A3 und der A71 beantworten die Forschungsfragen dieser Arbeit daher weniger detailliert als die auf der A1, der A2 und der B6 gewonnenen Messdaten. Deshalb werden die Verkehrsflussmessungen von der A3 und der A71 nur hier im Anhang aufgeführt.

### **A.1. Verkehrsflussmessungen auf der A3 bei Köln**

In diesem Abschnitt werden die Verkehrsflussmessungen von der A3 bei Köln ausgewertet. Es wird zunächst der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts vorgestellt ehe auf die Fahrmanöver, den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsorts eingegangen wird.

#### **A.1.1. Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A3)**

Auf der A3 bei Köln wird der Verkehr der Fahrtrichtung Oberhausen an einem Ort punktuell überwacht. Das Überwachungsgerät befindet sich am Fuße eines Anzeigequerschnitts der WVA. Das Geschwindigkeitsprofil des gesamten Streckenabschnitts wurde mit Hilfe der Verkehrsflussdaten der WVA-Sensoren und mit Hilfe der Trackingradarsensoren untersucht. Die ausschließliche Verwendung der Daten der WVA-Sensoren war hier nicht

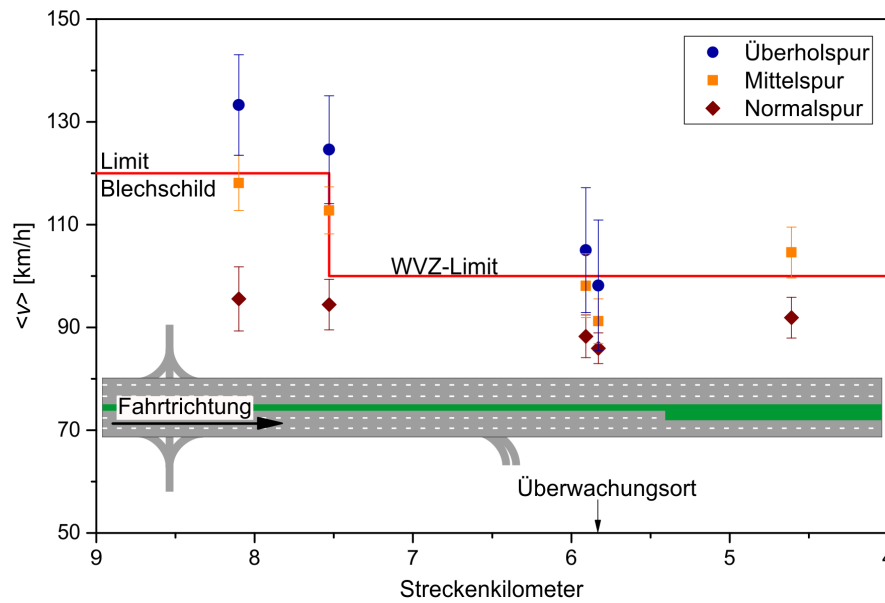
möglich, da sich am Überwachungsort kein Messquerschnitt mit WVA-Sensoren befand. Am Überwachungsort kamen daher die Trackingradarsensoren zum Einsatz, um das Geschwindigkeitsprofil zu vervollständigen. Die Messdaten der WVA-Sensoren wurden für insgesamt 4 Werktage von der VRZ abgerufen. Diese lagen in Form von Minutenmittelwerten vor. Um zu vermeiden, dass sich die Daten der WVA-Sensoren und der Trackingradarsensoren im Geschwindigkeitsprofil auf Grund der Art der Mittelwertbildung unterscheiden, wurden die Einzelfahrzeugdaten der Trackingradarsensoren ebenfalls zu Minutenmittelwerten aggregiert.

Wie auf der A1 und der A2 so wurden auch bei der Betrachtung des Verkehrsflusses auf der A3 spezielle Untersuchungszeiträume ausgewählt, in denen ein stabiler und freier Verkehrszustand vorlag. Ein stabiler und freier Verkehrszustand äußerte sich auf dem untersuchten Streckenabschnitt durch eine mittlere Geschwindigkeit von mehr als 90 km/h auf der Überholspur am Überwachungsort und einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Es wurde außerdem darauf geachtet, dass sich die von den einzelnen Anzeigequerschnitten dargestellten Höchstgeschwindigkeiten innerhalb eines Untersuchungszeitraums nicht änderten. Die Untersuchungszeiträume erstreckten sich typischerweise über 5 Stunden. Das heißt, ein Untersuchungszeitraum umfasste 300 Minutenmittelwerte.

Das Geschwindigkeitsprofil der A3 bei Köln wird in Abbildung A.1 für einen repräsentativen Untersuchungszeitraum dargestellt. Pro Fahrspur passierten 400 bis 4000 Fahrzeuge den Streckenabschnitt während dieses Zeitraums. Für dieses Profil wurden die Minutenmittelwerte der WVA-Sensoren und der Trackingradarsensoren jeweils fahrspurspezifisch gemittelt. Das Geschwindigkeitsprofil ließ sich sehr gut reproduzieren. Auf Grund der Fahrspurreduktion ca. 350 m hinter dem Überwachungsort (Streckenkilometer 5,4), existieren in diesem Geschwindigkeitsprofil bei Streckenkilometer 4,6 nur noch die Geschwindigkeitsmittelwerte zweier Fahrspuren. Die Abbildung A.1 enthält außerdem ein Schema des Streckenabschnitts. Erläuterungen zu diesem Schema können dem Anhang E entnommen werden.

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit ist in Abbildung A.1 in Form einer roten Linie eingetragen worden. Am Beginn des Streckenabschnitts existieren keine Anzeigequerschnitte der WVA. Dort wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit mittels einer festen Beschilderung dargestellt. Erst ab Streckenkilometer 7,5 sind Anzeigequerschnitte vorhanden. Deshalb war erst ab Streckenkilometer 7,5 ein WVZ-Limit gültig. Dieses betrug in allen Untersuchungszeiträumen 100 km/h.

Es wurden Differenztests durchgeführt, um zu verifizieren welche Geschwindigkeitsunterschiede im Geschwindigkeitsprofil der A3 als signifikant zu bezeichnen sind. Die durchgeführten Differenztests ergaben, dass bei den vorliegenden Messwerten Geschwindigkeitsunterschiede größer 2,8 km/h signifikant sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %). Das Geschwindigkeitsprofil der A3 bei Köln zeigt somit, dass jede Fahrspur ein ihr typisches Profil besitzt.



**Abbildung A.1.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der A3 bei Köln in der Fahrtrichtung Oberhausen. Die Geschwindigkeitsüberwachung findet bei Streckenkilometer 5,8 statt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte abseits des Überwachungsortes basieren auf den Minutenmittelwerten der WVA-Sensoren. Am Überwachungsort basieren die Geschwindigkeitsmittelwerte auf den Minutenmittelwerten der Trackingradarsensoren.

Das Geschwindigkeitsprofil der Normalspur weist im Vergleich zur Mittel- und Überholspur die niedrigsten Geschwindigkeiten auf. Die Ursache hierfür ist im LKW-Anteil zu finden. Dieser betrug auf der Normalspur ca. 40 % bis 50 % und war somit deutlich größer als der LKW-Anteil von Mittelspur (ca. 5 %) und Überholspur (ca. 0 %). Die Geschwindigkeitsmittelwerte auf der Normalspur variieren zwischen 86 km/h und 96 km/h. Sie sind überall deutlich kleiner als die zulässige Höchstgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsmittelwerte der Mittelspur betragen zwischen 91 km/h und 118 km/h. Die Werte der Mittelspur liegen damit fast ausschließlich unterhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Auf der Überholspur treten hingegen Geschwindigkeitsmittelwerte von 98 km/h bis 133 km/h auf. Für die Überholspur gilt, dass abseits des Überwachungsortes die mittlere Geschwindigkeit über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit liegt. Am Überwachungsort selbst, liegen die Geschwindigkeitsmittelwerte aller Fahrspuren unterhalb des Limits der WVA.

## Fazit

Anhand der Verkehrsflussdaten des gesamten Streckenabschnitts kann der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf der A3 bei Köln eine geschwindigkeitssenkende Wirkung bescheinigt werden. Die quantitative Abschätzung dieser Wirkung ist mit Hilfe dieser Messdaten aber nicht möglich, weil die Messwerte am Überwachungsort nicht

nur durch die Überwachung beeinflusst werden, sondern auch durch die bei Streckenkilometer 6,5 befindliche zweispurige Autobahnausfahrt. Zudem stehen die mittleren Geschwindigkeiten der benachbarten Messquerschnitte auf Grund des Absinkens der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei Streckenkilometer 7,5 und der Fahrspurreduktion bei Streckenkilometer 5,4 unter Einflüssen, die am Überwachungsort nicht vorhanden sind. Es war auf Grund dieser Gegebenheiten auch nicht möglich mit Hilfe der Verkehrsflussdaten des gesamten Streckenabschnitts den Einfluss der Geschwindigkeitsüberwachung auf die Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren und die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten zu untersuchen.

In den beiden folgenden Abschnitten werden nun die Fahrmanöver, der Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit in der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort untersucht (siehe Abschnitt A.1.2 und A.1.3). Im Gegensatz zu den Verkehrsflussdaten des gesamten Streckenabschnitts sind in diesen beiden Abschnitten auch quantitative Aussagen möglich.

### A.1.2. Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A3)

Um die Fahrmanöver und die Änderungen des Verkehrsflusses am Überwachungsort besser beurteilen zu können, wurden die Trackingradarsensoren auf dem am Überwachungsort befindlichen Anzeigequerschnitt installiert.

#### Zufahrt und Abfahrt

Die mittleren Geschwindigkeitsänderungen des Verkehrsflusses in der Zufahrt und der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes sind in Tabelle A.1 aufgelistet worden. Die Geschwindigkeitsänderungen der Zufahrt stellen die Differenzen zwischen den mittleren Geschwindigkeiten bei einer Entfernung von 20 m und einer Entfernung von 100 m dar. Für die Abfahrt wurden die Geschwindigkeitsänderungen mit Hilfe der mittleren Geschwindigkeiten bei einer Entfernung von –60 m und einer Entfernung von –30 m bestimmt. Die angegebenen Entfernungswerte beziehen sich auf den Standort der Trackingradarsensoren. Der Überwachungsort befindet sich in 20 m Entfernung. Der Tabelle A.1 ist zu entnehmen, dass alle Geschwindigkeitsänderungen der Zufahrt negativ sind und alle Geschwindigkeitsänderungen der Abfahrt positiv. Das heißt, die Fahrzeugführer bevorzugen in der Zufahrt ihr Fahrzeug zu verzögern und in der Abfahrt zu beschleunigen. Geschwindigkeitsdifferenzen größer 1,7 km/h sind hier auf Grund der vorliegenden Standardabweichungen und Stichprobenumfänge als signifikant zu betrachten (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %).

Die Geschwindigkeitsreduktionen von Mittel- und Überholspur in Tabelle A.1 nehmen einen ähnlichen Wert von ca. –7,0 km/h an. Diese sind damit signifikant. Für die Normalspur ergibt sich keine signifikante Geschwindigkeitsreduktion. Im Vergleich zur A1 und zur A2 nehmen die Geschwindigkeitsreduktionen für Mittel- und Überholspur auf der A3 signifikant größere Beträge an. Daraus lässt sich vermuten, dass die zugehörigen



Fahrspur	$\Delta v_{zu}$ [km/h]	$\Delta v_{ab}$ [km/h]
Normalspur	-1,6	+2,8
Mittelspur	-6,9	+2,3
Überholspur	-7,2	+1,1

**Tabelle A.1.:** Mittlere Geschwindigkeitsänderungen in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsortes für Zufahrt (zu) und Abfahrt (ab). Für die Zufahrt (Abfahrt) wurden die Geschwindigkeiten bei 20 m (-60 m) und 100 m (-30 m) Entfernung miteinander verglichen. Die angegebenen Entfernungswerte beziehen sich auf den Standort der Trackingradarsensoren. Die Daten basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Geschwindigkeitsänderungen betragsmäßig größer 1,7 km/h gelten hier als signifikant.

mittleren Verzögerungen auf der A3 betragsmäßig größer sind als auf der A1 und der A2. Mit Hilfe der mittleren Geschwindigkeiten der Überholspur in 20 m und 100 m Entfernung konnten die mittleren Verzögerungen für die A3 mit  $-0,7 \text{ m/s}^2$  abgeschätzt werden. Dieser Wert ist tatsächlich betragsmäßig signifikant größer als die von der A1 und der A2 bekannten Werte von  $-0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $-0,5 \text{ m/s}^2$ .

In der Abfahrt zeigt die Normalspur die größte Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit mit ca.  $+3,0 \text{ km/h}$ . Die Überhol- und Mittelspur zeigen kleinere mittlere Geschwindigkeitserhöhungen, die teilweise nicht signifikant sind. Als Grund dafür ist die Fahrspur-reduktion zu nennen, die sich ca. 350 m hinter dem Überwachungsort befindet. Die Fahrzeugführer der Überholspur müssen hinter dem Überwachungsort auf die Mittelspur wechseln. Die Fahrzeugführer der Mittelspur müssen diese Fahrspurwechsel ermöglichen. Diese Wechselwirkung führt dazu, dass die mittleren Geschwindigkeiten von Mittel- und Überholspur nicht in dem bekannten Maße zunehmen, wie es auf der A1 und der A2 zu sehen ist.

Die Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit in der Abfahrt der Normalspur ist vergleichbar mit den von der A1 und der A2 bekannten Werten. Berücksichtigt man aber, dass auf der A3 diese Erhöhung auf einer Strecke von 30 m erfolgt, während auf der A1 und der A2 die Fahrzeuge für diese Erhöhung 60 m zurückgelegt haben, so wird ersichtlich, dass in der Abfahrt der A3 auf der Normalspur im Mittel größere Beschleunigungen wirken. Analog zum Vorgehen in der Zufahrt konnte die mittlere Beschleunigung in der Abfahrt der Normalspur mit  $+0,7 \text{ m/s}^2$  bestimmt werden. Dies belegt den signifikant größeren Beschleunigungswert für die Normalspur der A3 im Vergleich zur A1 und zur A2.

Da eine quantitative Abschätzung der Wirkung der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf den Verkehrsfluss nicht möglich war (siehe Abschnitt A.1.1), gestaltete sich die Abschätzung des Wirkungsbereichs schwierig. Unter der Annahme, dass auf der Mittelspur die mittlere Geschwindigkeit abseits des Überwachungsortes 100 km/h beträgt – ein WVZ-Limit von 100 km/h vorausgesetzt – ergibt sich aus der Abschätzung ein Wir-

kungsbereich von  $2 \times 150 \text{ m} = 0,3 \text{ km}$ . Diese Abschätzung ist auf Grund der genannten Umstände mit einer großen Unsicherheit verbunden.

Die Einzelfahrzeugdaten der Trackingradarsensoren ermöglichten neben der Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit die Berechnung des Befolungsgrades am Anfang der Zufahrt und am Überwachungsort. Im Rahmen dieser Berechnung wurde nur die Überholspur betrachtet, da nur die Überholspur ausschließlich von PKWs befahren wurde, für die die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h galt. Am Anfang der Zufahrt – in einer Entfernung von 80 m zum Überwachungsort – betrug der Befolungsgrad auf der Überholspur 44,3 %. Auf Grund der Geschwindigkeitsreduktionen innerhalb der Zufahrt erhöhte sich der Befolungsgrad der Überholspur auf 66,9 % am Überwachungsort. Der Befolungsgrad stieg damit innerhalb der Zufahrt um ca. +20 Prozentpunkte. Die Steigerung des Befolungsgrades innerhalb der Zufahrt fiel auf der A1 mit ca. +10 Prozentpunkten und auf der A2 mit ca. +6 Prozentpunkten deutlich geringer aus. Dieser Unterschied in den Befolungsgradänderungen deutete sich bereits in den betragsmäßig größeren Geschwindigkeitsreduzierungen auf der A3 an.

### Fazit

Die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung auf der A3 bei Köln führt dazu, dass die Fahrzeugführer in der Zufahrt bevorzugt Verzögerungsmanöver durchführen und in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver. Auf Grund der gewählten Konfiguration, ermöglichten die Messdaten der Trackingradarsensoren nicht die Betrachtung der 12 Fahrmanöverklassen. Es konnten deshalb keine Aussagen zum Anteil der Verzögerungs- und Beschleunigungsmanöver getroffen werden. Es kann aber festgehalten werden, dass die mittlere Geschwindigkeit einer jeden Fahrspur am Überwachungsort ihren kleinsten Wert für den gesamten Streckenabschnitt annimmt.

Sowohl auf der A2 als auch auf der A3 wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h im Fall ohne Überwachung auf der Überholspur nur von einer Minderheit der Fahrzeugführer befolgt. Eine Betrachtung des Befolungsgrades in der Abfahrt ist auf der A3 angesichts der vielen Fahrspurwechsel nicht sinnvoll.

### A.1.3. Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A3)

Die Messdaten der Trackingradarsensoren ermöglichten auf Grund ihrer Konfiguration bei den Messungen auf der A3 nicht die Bestimmung der Verzögerungen der einzelnen Fahrzeuge. Es konnten daher nur die THW und die TTC als SSM betrachtet werden. Die MBVs der Fahrzeuge waren nicht verfügbar.

Die Auswertung der THW-Werte zeigte, dass auf der Überholspur die relative Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen ( $\text{THW} \leq 1 \text{ s}$ ), bezogen auf die Gesamtheit aller Nachfahrsituation ( $\text{THW} \leq 6 \text{ s}$ ), in jedem Untersuchungszeitraum größer war als auf der Normal- und der Mittelspur. Die relative Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen auf der Über-

holspur betrug zwischen 19,0 % und 22,0 %. Der Vergleich der Fahrspuren bezüglich des Fahrzeugabstands konnte aufzeigen, dass die Häufigkeit kritischer Fahrzeugabstände auf allen Fahrspuren vergleichbar war. Es wurde deshalb verifiziert, dass die Hauptursache für die große relative Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen auf der Überholspur in der mittleren Geschwindigkeit zu finden ist. Da die Geschwindigkeitsüberwachung die mittlere Geschwindigkeit senkt, ist anzunehmen, dass dadurch der Anteil kritischer THWs ebenfalls verringert wird. Der direkte Nachweis dieser Annahme konnte nur im Rahmen der Sonderuntersuchungen auf der A2 geführt werden (siehe Abschnitt 5.2.2).

Die relative Häufigkeit kritischer Kollisionssituationen ( $TTC \leq 5$  s) betrug am Überwachungsort der A3 maximal 0,5 % bezogen auf die Gesamtheit aller Fahrzeuge mit einer  $THW \leq 6$  s auf der jeweiligen Fahrspur. Auf Grund dieses kleinen Prozentwerts kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrmanöver in der Zufahrt und der Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes keine Häufung kritischer Kollisionssituationen hervorrufen. Der Maximalwert der relativen Häufigkeit kritischer Kollisionssituationen ist vergleichbar mit den entsprechenden Häufigkeiten auf der A1 und der A2.

### Fazit

In diesem Abschnitt konnte ermittelt werden, dass die größte relative Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen auf der A3 bei Köln immer auf der Überholspur zu finden ist. Als Hauptursache für diesen Effekt konnte die mittlere Geschwindigkeit ermittelt werden, die auf der Überholspur im Vergleich zu den anderen beiden Fahrspuren am größten ist. Mit Hilfe der TTC konnte verifiziert werden, dass die Fahrmanöver in der Zu- und Abfahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge haben.

### A.1.4. Zusammenfassung (A3)

Die Auswertung der Verkehrsflussmessungen auf der A3 bei Köln hat bezüglich der Fahrmanöver gezeigt (Forschungsfrage 1), dass die Fahrzeugführer in der Überwachungssituation Verzögerungsmanöver bevorzugen und danach bestrebt sind wieder zu beschleunigen.

Für den Verkehrsfluss folgt auf Grund dieser Fahrmanöver (Forschungsfrage 2), dass am Überwachungsort ein lokales Minimum für die mittlere Geschwindigkeit der drei Fahrspuren zu finden ist. Die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeiten in der Zufahrt beträgt ca.  $-1$  km/h bis  $-7$  km/h. In der Abfahrt betragen die entsprechenden mittleren Geschwindigkeitserhöhungen ca.  $+1$  km/h bis  $+3$  km/h. Die zugehörigen mittleren Verzögerungs- und Beschleunigungswerte waren in Zu- und Abfahrt vergleichbar mit betragsmäßig ca.  $0,7$  m/s<sup>2</sup>. Diese Werte sind signifikant größer als die von der A1, der A2 und der B6 bekannten mittleren Verzögerungen und mittleren Beschleunigungen.

Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf der A3 bei Köln konnte auf Grund vieler weiterer Einflussfaktoren nur mit einer großen Unsicherheit ab-

geschätzt werden. Diese Abschätzung führte zu einem Wert von ca. 0,3 km. Es war hier nicht möglich, zu prüfen, ob die Geschwindigkeitsüberwachung die Geschwindigkeitsdifferenzen benachbarter Fahrspuren und die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten beeinflusst.

Auf Grund der gewählten Konfiguration der Trackingradarsensoren konnten die kritischen Verzögerungsmanöver in diesem Abschnitt nicht untersucht werden, so dass die Forschungsfrage 3 hier nicht beantwortet werden konnte. Bezüglich der Kollisionssituationen (Forschungsfrage 4) zeigte sich aber, dass am Überwachungsort keine Häufung kritischer Kollisionssituationen zu beobachten ist. Die relative Häufigkeit kritischer Kollisionssituationen bezogen auf die Gesamtheit aller Nachfahrssituationen betrug maximal 0,5 %.

Im Hinblick auf die Verkehrssicherheit kann somit geschlussfolgert werden (Forschungsfrage 5), dass das punktuelle Geschwindigkeitsüberwachungsgerät auf der A3 bei Köln die Verkehrssicherheit lokal erhöht, da es die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses reduziert und nicht zu einer Häufung kritischer Kollisionssituationen führt. Das heißt, dass dieses Überwachungsgerät die verkehrssichernde Wirkung der WVA unterstützt (Forschungsfrage 6).

Die Abhängigkeit der hier gegebenen Antworten von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit konnte auf der A3 nicht untersucht werden, weil der freie Verkehrsfluss nur für die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auftrat.

## A.2. Verkehrsflussmessungen auf der A71 bei Suhl

Im Folgenden werden nun die Verkehrsflussmessungen von der A71 bei Suhl ausgewertet. Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt, so wird auch hier zunächst der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts vorgestellt, bevor auf die Fahrmanöver, den Verkehrsfluss und die Verkehrssicherheit in der unmittelbaren Umgebung des Überwachungsorts eingegangen wird.

### A.2.1. Der Verkehrsfluss des gesamten Streckenabschnitts (A71)

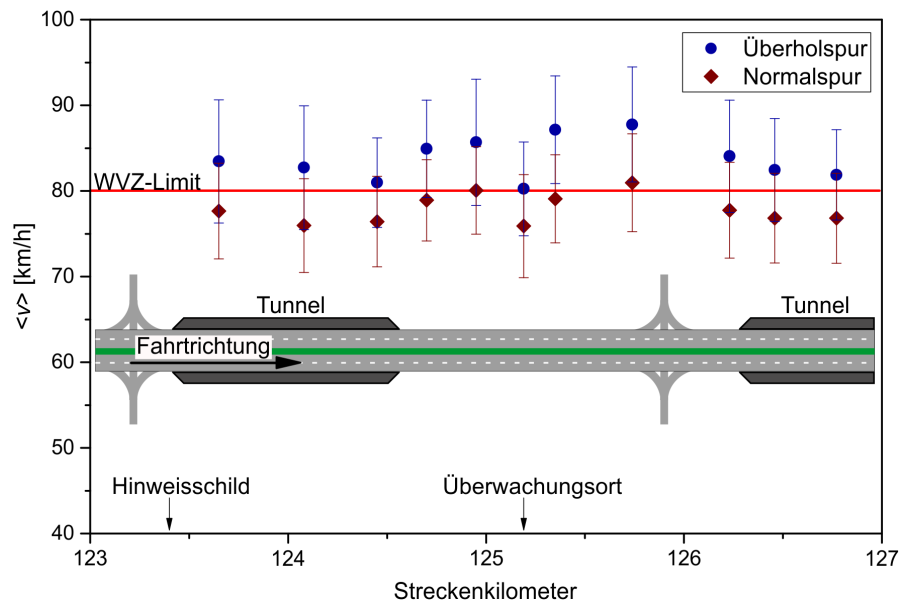
Auf der A71 bei Suhl wird in beiden Fahrtrichtungen (Fahrtrichtung Erfurt und Fahrtrichtung Schweinfurt) die von der WVA angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit jeweils an einem Ort punktuell überwacht. An beiden Überwachungsorten befindet sich ein Anzeigequerschnitt der WVA. Die Überwachungsgeräte befinden sich jeweils am Fuße des Anzeigequerschnitts. Das Geschwindigkeitsprofil des Streckenabschnitts wurde für jede Fahrtrichtung untersucht. Dafür kamen fast ausschließlich die WVA-Sensoren zum Einsatz. Da am Überwachungsort der einen Fahrtrichtung die WVA-Sensoren nicht korrekt arbeiteten und am Überwachungsort der anderen Fahrtrichtung keine WVA-Sensoren vorhanden waren, wurden für die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeiten an den

beiden Überwachungsorten die Trackingradarsensoren verwendet. Die Messdaten der WVA-Sensoren lagen in der VRZ in Form von Stundenmittelwerten vor. Von der VRZ wurden diese für jede Fahrtrichtung für jeweils 3 Werktage abgerufen. Als Untersuchungszeiträume wurden Zeiten eines stabilen und freien Verkehrsflusses gewählt. Dieser Verkehrszustand zeichnet sich auf der A71 durch eine mittlere Geschwindigkeit größer 75 km/h auf der Überholspur am Überwachungsort und eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h aus. Es wurde darauf geachtet, dass sich das angezeigte Limit eines jeden Anzeigequerschnitts des Streckenabschnitts während eines Untersuchungszeitraums nicht änderte.

Die Untersuchungszeiträume erstreckten sich auf der A71 über 2 bis 4 Stunden. Die zu einem Untersuchungszeitraum zugehörigen Stundenmittelwerte der WVA-Sensoren wurden jeweils fahrspurselektiv gemittelt, um den jeweiligen Geschwindigkeitsmittelwert zu bestimmen. Bei dieser Mittelwertbildung floss die Verkehrsstärke als Gewichtung mit ein. Außerdem war die zu jedem Stundenmittelwert zugehörige Standardabweichung bekannt, so dass aus den Standardabweichungen der Stundenmittelwerte die Standardabweichung des zugehörigen Geschwindigkeitsmittelwertes bestimmt werden konnte. Diese Geschwindigkeitsmittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen entstammen somit einer Mittelwertbildung, die vergleichbar ist mit der Mittelwertbildung aller Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten. Es genügte daher, die Geschwindigkeitsmesswerte der Trackingradarsensoren einer einfachen Mittelwertbildung zu unterziehen, um diese im Geschwindigkeitsprofil verwenden zu können. Eine Aggregation der Messdaten der Trackingradarsensoren, wie auf der A3, fand hier daher nicht statt.

Die Geschwindigkeitsmittelwerte und zugehörigen Standardabweichungen wurden in Abbildung A.2 über den zugehörigen Streckenkilometer für einen repräsentativen Untersuchungszeitraum aufgetragen. Sie stellen das Geschwindigkeitsprofil der A71 bei Suhl für die Fahrtrichtung Schweinfurt dar. Pro Fahrspur passierten 300 bis 3000 Fahrzeuge den Streckenabschnitt während des Untersuchungszeitraums. Die Abbildung A.2 enthält zusätzlich ein Schema des Streckenabschnitts. Erläuterungen dazu finden sich im Anhang E.

Das Geschwindigkeitsprofil der Fahrtrichtung Schweinfurt und auch das Profil der Gegenrichtung (Fahrtrichtung Erfurt) ließen sich sehr gut reproduzieren. Es wurde mittels Differenztests bestimmt, dass bei den vorliegenden Mittelwerten im Geschwindigkeitsprofil der A71 Unterschiede größer 1,4 km/h signifikant sind (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %). Die Betrachtung der Geschwindigkeitsprofile von Normal- und Überholspur zeigt daher, dass beide Fahrspuren sich bezüglich der mittleren Geschwindigkeit an jedem Messort signifikant unterscheiden. Jede Fahrspur besitzt ein ihr typisches Profil. In Abbildung A.2 wird die von der WVA angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit (WVZ-Limit) mit Hilfe einer roten Linie visualisiert. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit betrug in allen Untersuchungszeiträumen und in beiden Fahrtrichtungen 80 km/h.



**Abbildung A.2.:** Profil der mittleren Geschwindigkeit für den Streckenabschnitt der A71 bei Suhl in der Fahrtrichtung Schweinfurt. Die Geschwindigkeitsüberwachung findet bei Streckenkilometer 125,2 statt. Die Geschwindigkeitsmittelwerte abseits des Überwachungsortes basieren auf den Stundenmittelwerten der WVA-Sensoren. Am Überwachungsort basieren die Geschwindigkeitsmittelwerte auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren.

Der Verkehr auf der Überholspur setzte sich nur aus PKW zusammen, da auf dem gesamten Streckenabschnitt ein LKW-Überholverbot galt, welches sehr gut befolgt wurde. Das Geschwindigkeitsprofil der Überholspur variiert zwischen 80 km/h und 90 km/h. Es liegt damit fast überall oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Am Anfang des Streckenabschnitts sinkt die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur in Fahrtrichtung langsam ab. In diesem Bereich fahren die Fahrzeugführer in einen Tunnel hinein, an dessen Beginn ein Hinweisschild ohne Entfernungsangabe auf die Überwachungssituation hinweist. Auf Grund der Überlagerung des Überwachungsdrucks des Hinweisschildes mit dem Einfluss der Tunneldurchfahrt, kann an dieser Stelle nicht bestimmt werden, ob das Hinweisschild eine mittlere Geschwindigkeitsreduktion zur Folge hat. Hinter dem Tunnelabschnitt, ab Streckenkilometer 124,5, verläuft die Fahrbahn mit einem Gefälle von ca. 2 % bergab. Die Fahrzeugführer der Überholspur erhöhen in diesem Bereich ihre Geschwindigkeit. Am Überwachungsort bei Streckenkilometer 125,2 wird der ansteigende Trend der mittleren Geschwindigkeit kurz unterbrochen und die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur erreicht ihr Minimum – bezogen auf den gesamten Streckenabschnitt. Dieses Minimum entspricht exakt der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. In Fahrtrichtung hinter dem Überwachungsort steigt die mittlere Geschwindigkeit weiter an. Das Maximum erreicht sie im Bereich einer Anschlussstelle bei Streckenkilometer 125,7. Danach fällt die mittlere Geschwindigkeit wieder ab, weil dort der Verkehr in einen Tunnel hineinfährt,

in dem punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung betrieben wird. Dieser zweite Überwachungsort befindet sich bei Streckenkilometern größer 127,0. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Fahrzeugführer der Überholspur die zulässige Höchstgeschwindigkeit abseits des Überwachungsortes kaum befolgen. Das heißt, die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h findet kaum Akzeptanz.

Der LKW-Anteil auf der Normalspur betrug ca. 25 %. Das Geschwindigkeitsprofil der Normalspur folgt dem Profil der Überholspur mit einer ca. 5 km/h kleineren mittleren Geschwindigkeit. Nur das Maximum der mittleren Geschwindigkeit der Normalspur im Bereich der Anschlussstelle bei Streckenkilometer 125,7 liegt oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. An den restlichen Messorten befolgen die Fahrzeugführer der Normalspur die zulässige Höchstgeschwindigkeit sehr gut. Das Minimum der mittleren Geschwindigkeit wird auch auf der Normalspur am Überwachungsort erreicht.

Die geschwindigkeitssenkende Wirkung des punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes kann mit Hilfe der mittleren Geschwindigkeiten am Überwachungsort und den mittleren Geschwindigkeiten der benachbarten Messquerschnitte bestimmt werden. Für beide Fahrspuren ergibt sich eine Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit von ca. –5 km/h.

Da die geschwindigkeitssenkende Wirkung für beide Fahrspuren gleichgroß ist, reduziert die punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung hier nicht die mittlere Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Fahrspuren, wie es auf der A1 und der A2 beobachtet werden konnte. Eine signifikante Änderung der Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten, die auf die Geschwindigkeitsüberwachung zurückgeführt werden könnte, ist hier ebenfalls nicht beobachtbar.

Das Geschwindigkeitsprofil der Fahrtrichtung Erfurt ähnelt sehr dem der Fahrtrichtung Schweinfurt. Die mittleren Geschwindigkeiten der Normal- und der Überholspur nehmen jeweils am Überwachungsort ihr Minimum für den gesamten Streckenabschnitt an. Die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur liegt auch in der Fahrtrichtung Erfurt abseits des Überwachungsortes deutlich oberhalb der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h. Die Normalspur folgt dem Profil der Überholspur mit einer konstanten Differenz von ca. –5 km/h.

In der Fahrtrichtung Erfurt existiert ebenfalls ein Hinweisschild, welches ohne Entfernungsangabe auf die Überwachungssituation hinweist. Die Wirkung dieses Hinweisschild wird von der unmittelbar vor dem Hinweisschild befindlichen Anschlussstelle und dem Beginn einer 2 %-igen Steigungsstrecke überlagert. Deshalb konnte die Wirkung des Hinweisschildes in der Fahrtrichtung Erfurt ebenfalls nicht abgeschätzt werden.

## **Fazit**

Die Betrachtung des Verkehrsflusses des gesamten Streckenabschnitts auf der A71 bei Suhl hat gezeigt, dass die dort befindliche punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung in beiden Fahrtrichtungen zu einem lokalen Minimum der mittleren Geschwindigkeit führt. Insgesamt beträgt die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit, die der Überwachung zugeschrieben werden kann, ca.  $-5$  km/h.

Die Untersuchung der Fahrmanöver, des Verkehrsflusses am Überwachungsort (siehe Abschnitt A.2.2) und die Betrachtung der Verkehrssicherheit am Überwachungsort (siehe Abschnitt A.2.3) werden weitere Einblicke bezüglich des Einflusses der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung auf der A71 bei Suhl geben.

### **A.2.2. Der Verkehrsfluss am Überwachungsort (A71)**

Die Messdaten der Trackingradarsensoren wurden auch auf der A71 verwendet, um die Fahrmanöver an den beiden Überwachungsorten zu untersuchen.

#### **Zufahrt und Abfahrt**

Für beide Überwachungsorte sind in der Tabelle A.2 die mittleren Geschwindigkeitsänderungen des Verkehrsflusses in der Zufahrt und der Abfahrt des jeweiligen Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes gegenübergestellt worden. Für die Bestimmung der Geschwindigkeitsänderungen der Zufahrten wurden jeweils die Differenzen der mittleren Geschwindigkeiten bei einer Entfernung von 20 m und einer Entfernung von 100 m berechnet. Für die Abfahrt wurden analog die mittleren Geschwindigkeiten bei einer Entfernung von  $-60$  m und einer Entfernung von  $-30$  m verwendet. Der Abfahrt wurden hier wieder negative Entfernungswerte zugeordnet.

Die Geschwindigkeitsänderungen nehmen für die Zufahrten beider Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte negative Werte an. Daraus folgt, dass in den Zufahrten von den Fahrzeugführern bevorzugt Verzögerungsmanöver durchgeführt werden. Für die Abfahrten sind die Geschwindigkeitsänderungen positiv, weil dort im Gegensatz zu den Zufahrten bevorzugt Beschleunigungsmanöver durchgeführt werden. Geschwindigkeitsänderungen mit einem Betrag größer  $1,0$  km/h sind hier auf Grund der vorliegenden Standardabweichungen und Stichprobenumfänge als signifikant zu betrachten (Irrtumswahrscheinlichkeit 1 %).

Für die Fahrtrichtung Schweinfurt sind alle Geschwindigkeitsänderungen in der Zu- und Abfahrt signifikant. Für diese Fahrtrichtung gilt außerdem, dass die Geschwindigkeitsänderungen auf der Überholspur betragsmäßig signifikant größer sind als die entsprechenden Werte auf der Normalspur. Im Vergleich zur A1 und zur A2 zeigt sich, dass die mittleren Geschwindigkeitsreduzierungen der Zufahrt in dieser Fahrtrichtung ähnlich zu den bereits bekannten Werten sind. Berücksichtigt man, dass die Abfahrt hier im Vergleich zur A1 und A2 etwas kürzer ist, so gilt dies auch entsprechend für die Geschwindigkeitserhö-



Fahrspur	Fahrtrichtung Schweinfurt		Fahrtrichtung Erfurt	
	$\Delta v_{zu}$ [km/h]	$\Delta v_{ab}$ [km/h]	$\Delta v_{zu}$ [km/h]	$\Delta v_{ab}$ [km/h]
Normalspur	-1,9	+1,2	-0,8	+0,5
Überholspur	-3,2	+2,2	-0,8	+0,9

**Tabelle A.2.:** Mittlere Geschwindigkeitsänderungen in der unmittelbaren Umgebung der beiden Überwachungsorte für Zufahrt (zu) und Abfahrt (ab). Für die Zufahrt (Abfahrt) wurden die Geschwindigkeiten bei 20 m (-60 m) und 100 m (-30 m) Entfernung miteinander verglichen. Die angegebenen Entfernungswerte beziehen sich auf die Standorte der Trackingradarsensoren. Die Daten basieren auf den Einzelfahrzeuggeschwindigkeiten der Trackingradarsensoren. Geschwindigkeitsänderungen betragsmäßig größer 1,0 km/h gelten hier als signifikant.

hungen der Abfahrt. Daraus folgt, dass die auftretenden mittleren Verzögerungen und Beschleunigungen vergleichbar sind mit den auf der A1 und der A2 gefundenen Werten von  $0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

Der Vergleich der Geschwindigkeitsreduzierungen der Fahrtrichtung Schweinfurt mit den aus dem Geschwindigkeitsprofil abgeschätzten Reduzierungen von ca.  $-5 \text{ km/h}$  zeigt, dass die Fahrzeugführer bereits mehr als 80 m vor dem Überwachungsort beginnen ihre Geschwindigkeit zu reduzieren. Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung in der Fahrtrichtung Schweinfurt lässt sich daraus mit  $2 \times 100 \text{ m} = 0,2 \text{ km}$  abschätzen. Dieser Wert ist kleiner als die Wirkungsbereiche der punktuellen Überwachungsgeräte auf der A1, der A2, der B6 und der A3.

Für die Fahrtrichtung Erfurt konnten keine signifikanten Geschwindigkeitsänderungen in der Zu- und Abfahrt gefunden werden. Vermutlich ist dies auf die in Fahrtrichtung ansteigende Fahrbahn, das ca. 400 m vor dem Überwachungsort positionierte Hinweisschild und die zuvor befindliche Anschlussstelle zurückzuführen. Eine Abschätzung des Wirkungsbereiches der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung in der Fahrtrichtung Erfurt ist auf Grund dieser parallel wirkenden Einflüsse nicht sinnvoll.

Die zulässige Höchstgeschwindigkeit von  $80 \text{ km/h}$  galt sowohl für PKW als auch für LKW. In der Fahrtrichtung Schweinfurt beträgt der Befolgungsgrad 80 m vor dem Überwachungsort 28,1 % für die Überholspur und 69,4 % für die Normalspur. Da die mittlere Geschwindigkeit der Normalspur immer kleiner war als die mittlere Geschwindigkeit der Überholspur ist dieser Unterschied hier nicht überraschend. Bis zum Überwachungsort hin steigern sich beide Befolgungsgrade. Für die Überholspur beträgt der Befolgungsgrad am Überwachungsort 48,6 % und für die Normalspur 80,5 %. Da die mittlere Geschwindigkeitsreduzierung innerhalb der Zufahrt für die Überholspur größer ist als für die Normalspur, erhöht sich der Befolgungsgrad der Überholspur mehr als der Befolgungsgrad der Normalspur.

Für die Fahrtrichtung Erfurt betragen die Befolungsgrade 80 m vor dem Überwachungs-ort 45,4 % für die Überholspur und 81,5 % für die Normalspur. In der Zufahrt des Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes der Fahrtrichtung Erfurt erhöhen sich die beiden Befolungsgrade ebenfalls. Am Überwachungsort beträgt der Befolungsgrad der Überholspur 55,0 % und der Befolungsgrad der Normalspur 86,2 %. Der Vergleich bei-der Fahrtrichtungen zeigt, dass die Befolungsgrade der Fahrtrichtung Erfurt deutlich höher sind als in der Fahrtrichtung Schweinfurt. Als Ursachen sind hier wieder die Stei-gungsstrecke, die Anschlussstelle und das 400 m vor dem Überwachungsort befindliche Hinweisschild zu nennen.

### Fazit

Mit Hilfe der detaillierten Betrachtung der Fahrmanöver und des Verkehrsflusses in der unmittelbaren Umgebung der beiden Überwachungsorte konnte festgestellt werden, dass die Fahrzeugführer in der Zufahrt zum Überwachungsort bevorzugt verzögern und in der Abfahrt bevorzugt beschleunigen. Die dabei im Mittel auftretenden Geschwindig-keitsänderungen, Verzögerungswerte und Beschleunigungswerte waren vergleichbar mit den von der A1 und der A2 bekannten Werten. Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte hier mit ca. 0,2 km abgeschätzt werden.

### A.2.3. Die Verkehrssicherheit am Überwachungsort (A71)

Auf Grund der Konfiguration der Trackingradarsensoren waren auf der A71 als SSM nur die THW und die TTC bestimmbar. Die MBV der Fahrzeuge war hier nicht zugänglich.

In beiden Fahrtrichtungen ergab die Betrachtung der THW, dass die relative Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen ( $\text{THW} \leq 1 \text{ s}$ ) auf der Überholspur mit 9,3 % bis 20,8 % in jedem Untersuchungszeitraum größer ist als auf der Normalspur. Die relative Häufigkeit wurde dabei immer auf die Gesamtheit aller Nachfahrsituationen ( $\text{THW} \leq 6 \text{ s}$ ) einer Fahrspur bezogen. Als Hauptursache für diesen Effekt konnte wie auf der A1, der A2 und der A3 die höhere mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf der Überholspur bestimmt werden. Auf Grund des festgestellten Zusammenhangs zwischen mittlerer Geschwindigkeit und relativer Häufigkeit kritischer THWs, ist anzunehmen, dass die geschwindigkeitssen-kende Wirkung der Überwachung den Anteil kritischer THWs senkt. Diese Annahme konnte nur im Rahmen der Sonderuntersuchungen auf der A2 hinsichtlich ihrer Korrekt-heit verifiziert werden (siehe Abschnitt 5.2.2).

Für die kritischen Kollisionssituationen ( $\text{TTC} \leq 5 \text{ s}$ ) konnte an beiden Überwachungs-orten der A71 eine relative Häufigkeit von maximal 0,8 % ermittelt werden. Auf Grund dieses kleinen Prozentwertes, kann festgehalten werden, dass die Fahrmanöver in der Zufahrt und der Abfahrt der Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte daher keine Häufung kritischer Kollisionssituationen hervorrufen. Die relativen Häufigkeiten kritischen Kol-lisionssituationen für die beiden Überwachungsorte der A71 sind vergleichbar mit den entsprechenden Häufigkeiten auf der A1, der A2 und der A3.

## Fazit

In diesem Abschnitt konnte gezeigt werden, dass auf Grund der größeren mittleren Geschwindigkeit auf der Überholspur dort auch die größten Werte für die relative Häufigkeit kritischer Auffahrsituationen zu finden sind. Weiterhin zeigte sich, dass an beiden Überwachungsorten keine Häufung kritischer Kollisionssituationen auftritt.

### A.2.4. Zusammenfassung (A71)

Mit Hilfe der Verkehrsflussmessungen konnte in diesem Abschnitt im Bezug auf die Fahrmanöver nachgewiesen werden (Forschungsfrage 1), dass in der Zufahrt der Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A71 bei Suhl von den Fahrzeugführern bevorzugt Verzögerungsmanöver vorgenommen werden und in der Abfahrt bevorzugt Beschleunigungsmanöver. Die dabei auftretenden Verzögerungs- und Beschleunigungswerte betrugen im Mittel ca.  $0,1 \text{ m/s}^2$  bis  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

Für den Verkehrsfluss kann an dieser Stelle zusammengefasst werden (Forschungsfrage 2), dass die punktuelle Geschwindigkeitsüberwachung auf der A71 bei Suhl lokal zu reduzierten mittleren Geschwindigkeiten führt. Insgesamt betrug die Absenkung der mittleren Geschwindigkeit ca.  $-5 \text{ km/h}$ . In der unmittelbaren Umgebung zum Überwachungsort betragen die Geschwindigkeitsreduzierungen in der Zufahrt im Mittel ca.  $-1 \text{ km/h}$  bis  $-3 \text{ km/h}$ . Die mittleren Geschwindigkeitserhöhungen in der Abfahrt betragen entsprechend ca.  $+1 \text{ km/h}$  bis  $+2 \text{ km/h}$ .

Eine Wirkung auf die Geschwindigkeitsdifferenzen der beiden Fahrspuren und auf die Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten konnte für die punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A71 nicht nachgewiesen werden. Der Wirkungsbereich der punktuellen Geschwindigkeitsüberwachung konnte hier mit ca.  $0,2 \text{ km}$  abgeschätzt werden.

Die durchgeführten Verkehrsflussmessungen auf der A71 bieten keine Möglichkeit kritische Verzögerungsmanöver zu untersuchen (Forschungsfrage 3). Bezüglich der Kollisionssituationen kann aber der Schluss gezogen werden (Forschungsfrage 4), dass am Überwachungsort keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zu beobachten sind. Die relative Häufigkeit kritischer Kollisionssituationen bezogen auf die Gesamtheit aller Nachfahrsituationen betrug hier maximal  $0,8 \%$ .

Weil beide Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A71 bei Suhl die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsflusses lokal reduzieren und keine Häufungen kritischer Kollisionssituationen zur Folge haben, kann im Hinblick auf die Verkehrssicherheit geschlussfolgert werden (Forschungsfrage 5), dass beide Überwachungsgeräte die Verkehrssicherheit lokal erhöhen. Vor dem Hintergrund, dass beide Überwachungsgeräte in Kombination mit einer WVA betrieben werden, folgt daraus, dass diese die verkehrssichernde Wirkung der WVA unterstützen (Forschungsfrage 6).

Die Abhängigkeit der hier gegebenen Antworten von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit konnte auf der A71 nicht untersucht werden, weil der freie Verkehrsfluss nur für die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h auftrat.

## B. Weitere Auswertung der Umfrage

Zusätzlich zu den im Kapitel 4 ausgewerteten Fragenkomplexen der Umfrage werden in diesem Anhang der fünfte und sechste Fragenkomplex (Meinung und Kenntnis) aufbereitet. Außerdem werden hier die Einflüsse auf die Umfrageergebnisse untersucht, die von den Teilnehmerfaktoren Routine, Geschlecht und Alter ausgehen. Im Unterschied zu den Fragenkomplexen von Kapitel 4 standen die hier präsentierten Aspekte nicht im Fokus dieser Arbeit.

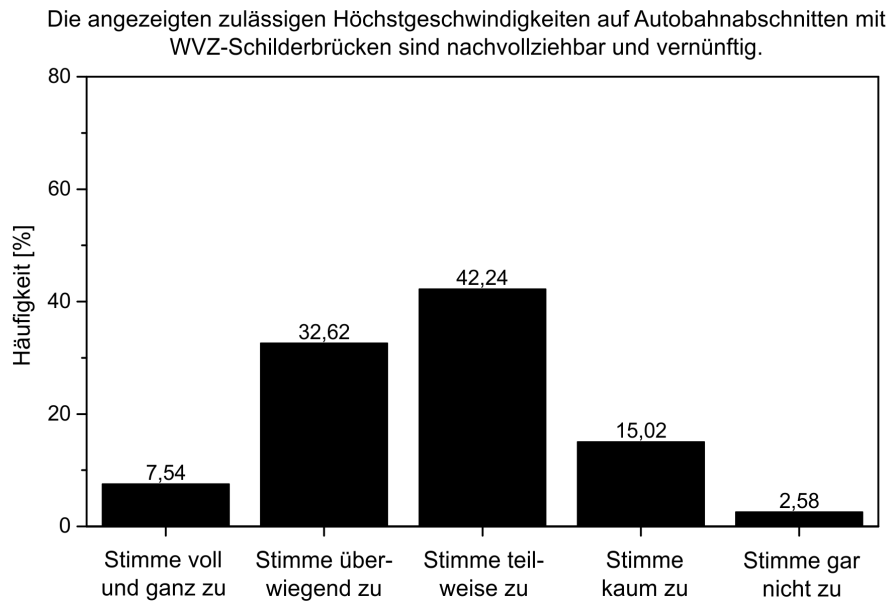
### B.1. Fragenkomplex: Meinung

Im fünften Fragenkomplex mussten die Teilnehmer ihre Meinung zu ausgewählten Aspekten der Geschwindigkeitsüberwachung äußern. Der fünfte Fragenkomplex umfasste die Fragen 11 bis 13.

In Frage 11 wurden die Teilnehmer zur Sinnhaftigkeit der Schaltprogramme der WVA befragt. Ein großer Teil der Befragten, 40,16 %, stimmte „voll und ganz“ oder „überwiegend“ zu, dass die angezeigten WVZ nachvollziehbar und vernünftig sind (Abbildung B.1). Weitere 42,24 % stimmten dem „teilweise“ zu. Die restlichen 17,60 % der Teilnehmer sind von der Sinnhaftigkeit der Schaltprogramme der WVA nicht überzeugt, sie stimmten „kaum“ oder „gar nicht“ zu. Diese vorwiegend gute Akzeptanz steht im Widerspruch zu den Ergebnissen aus dem Teil 1 der Frage 3. Dort gaben nur 28,25 % der Befragten an, auf Streckenabschnitten mit WVZ-Schilderbrücken die zulässige Höchstgeschwindigkeit „selten“ oder „nie“ um 10 km/h bis 20 km/h zu übertreten.

Ob nach Meinung der befragten Autofahrer die Geschwindigkeitsüberwachung den Befolgungsgrad der mittels WVZ angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten erhöht, wurde mittels Frage 12 erörtert. Die Häufigkeiten der von den befragten Autofahrern ausgewählten Antworten deuten darauf hin, dass diese nur teilweise von einer Befolgungsgraderhöhung überzeugt sind. 37,64 % der Befragten stimmten in Frage 12 „voll und ganz“ oder „überwiegend“ zu. Dem gegenüber stehen 30,04 % der Befragten, die „teilweise“ zustimmen, und 32,32 % der Befragten, die „kaum“ oder „gar nicht“ zustimmen (Abbildung B.2). Die Verkehrsflussmessungen in Kapitel 5 und Anhang A zeigen aber deutlich, dass eine solche Befolgungsgraderhöhung mit Hilfe der Geschwindigkeitsüberwachung erzielt werden kann.

In Frage 13 wurde die Zustimmung zu folgender Behauptung erfragt: „Hinweisschilder vermindern die Verkehrssicherheit, da sie auf den konkreten Überwachungsort hinweisen“.



**Abbildung B.1.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 11.

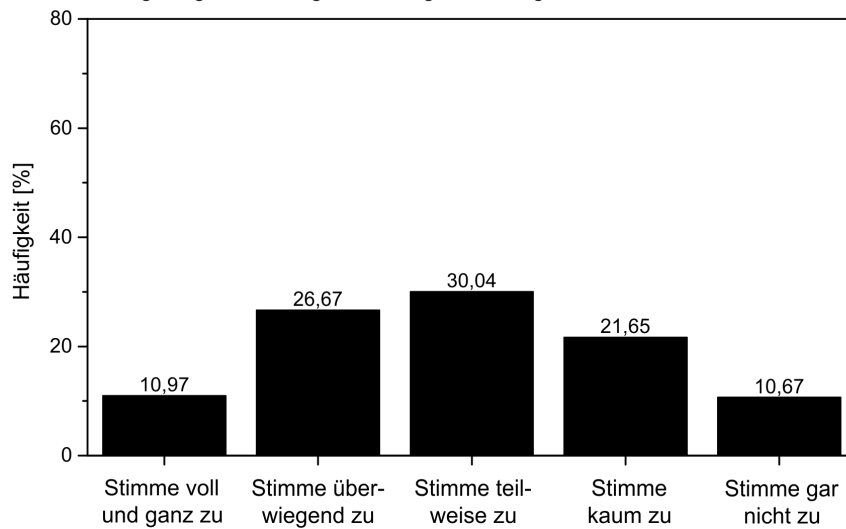
Die Mehrheit der Befragten, 53,16 %, stimmte dieser Behauptung „kaum“ oder „gar nicht“ zu. Nur 24,77 % der Teilnehmer stimmten hier „voll und ganz“ oder „überwiegend“ zu. Die übrigen Teilnehmer, 22,07 %, waren unentschlossen und stimmten daher nur „teilweise“ zu (Abbildung B.3).

In der Tat wirken Hinweisschilder eher verkehrssichernd. Hinweisschilder konzentrieren den Überwachungsdruck auf den konkreten Überwachungsort. Am Überwachungsort wird daher die mittlere Geschwindigkeit im Fall mit Hinweisschild typischerweise stärker abgesenkt als für den Fall ohne Hinweisschild (siehe Abschnitt 2.4.2 und Abschnitt 5.3.2). Zusätzlich vermindern Hinweisschilder das Auftreten von kritischen Verzögerungsmanövern vor dem Überwachungsgerät (siehe Abschnitt 5.3.2). Beide Effekte sind als Sicherheitsgewinn zu werten. Andererseits ist es denkbar, dass auf Grund der Konzentration des Überwachungsdruckes durch das Hinweisschild die Geschwindigkeiten abseits des Überwachungsortes weniger durch die Geschwindigkeitsüberwachung beeinflusst werden als für den Fall ohne Hinweisschild. Wenn dieser Effekt auftreten sollte, dann ist dieser als Sicherheitsverlust zu werten.

## B.2. Fragenkomplex: Kenntnis

Im sechsten Fragenkomplex wurde die Orts- und Regelkenntnis der Teilnehmer betrachtet. Die Fragen 14 und 15 zählten zu diesem Fragenkomplex. Bei der Betrachtung der Prozentwerte ist zu beachten, dass in beiden Fragen Mehrfachantworten möglich waren.

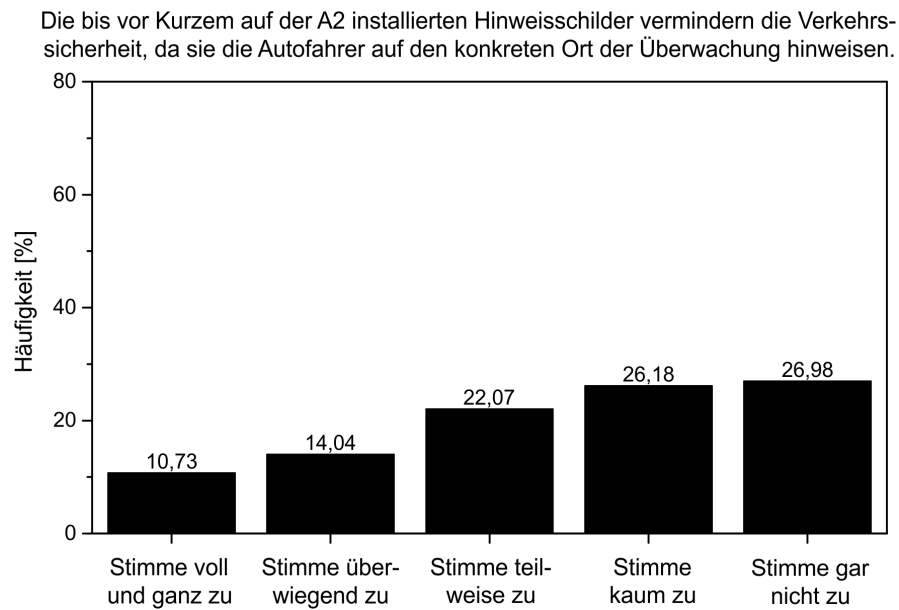
Die Geschwindigkeitsüberwachung steigert den Befolgungsgrad der mittels WVZ-Schilderbrücken angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf Autobahnabschnitten.



**Abbildung B.2.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 12.

In Frage 14 wurden die Bekanntheitsgrade, der auf der A2 zwischen Helmstedt und Hannover befindlichen stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte, erfragt (Abbildung B.4). Die beiden Überwachungsgeräte in der Nähe des Rastplatzes Essehof sind 34,93 % bzw. 33,64 % der Befragten bekannt. Die Messgeräte an den Standorten Braunschweig-Hafen und Rastplatz Zweidorfer Holz sind etwas besser bekannt mit 37,01 % und 40,20 %. Das Überwachungsgerät in der Nähe des Rastplatzes Röhre ist am wenigsten bekannt. Nur 23,16 % der Befragten gaben hier an dieses zu kennen. Für 40,26 % der Befragten ist keiner der aufgezählten Standorte bekannt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Befragten die Standorte der stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A2 zwischen Helmstedt und Hannover gut kennen. Der individuelle Bekanntheitsgrad hängt dabei natürlich stark vom Wohn- und Arbeitsort der Befragten ab.

Die Regelkenntnis unter den Teilnehmern wurde mittels Frage 15 bestimmt. In Abbildung B.5 werden die Ergebnisse zu dieser Frage dargestellt. Dieser Abbildung ist zu entnehmen, dass 22,24 % der Befragten davon ausgehen, dass eine ausgeschaltete WVZ-Schilderbrücke die zulässige Höchstgeschwindigkeit aufhebt. Diese Annahme ist nicht immer korrekt. Grundsätzlich gilt, dass eine Geschwindigkeitsbegrenzung nur durch die Verkehrszeichen Z 278 (Ende der zulässigen Höchstgeschwindigkeit) bzw. Z 282 (Ende sämtlicher Streckenverbote) aufgehoben wird. Dies trifft nicht auf Geschwindigkeitsbegrenzungen zu, die zusammen mit einem Zusatzzeichen oder Gefahrenzeichen angekündigt werden (vgl. Anlage 2 Abschnitt 7 zu § 41 Absatz 1 in [SVO13]). Das heißt, dass ausgeschaltete WVZ-Schilderbrücken nicht automatisch zu einer Aufhebung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit führen. Auf Autobahnabschnitten mit einer WVA, die eine



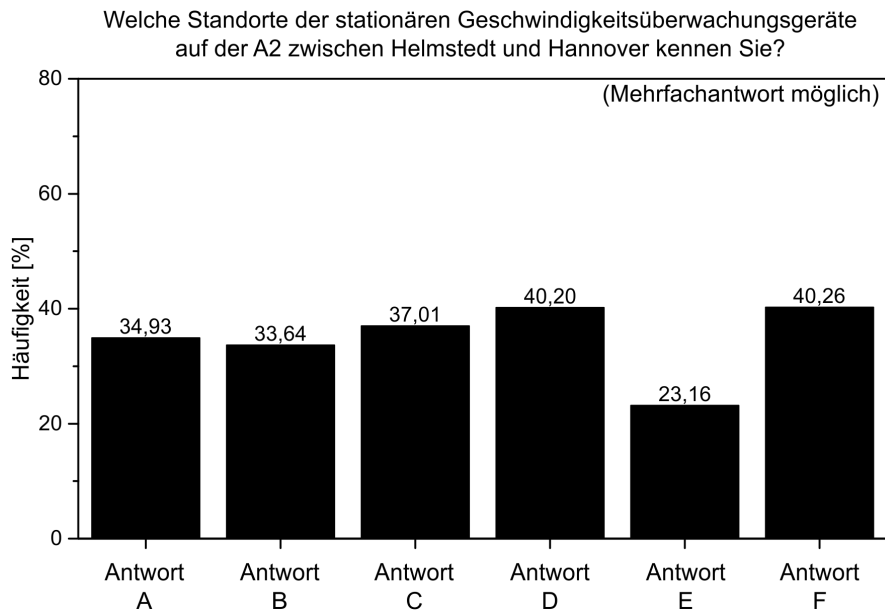
**Abbildung B.3.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 13.

zulässige Höchstgeschwindigkeit anzeigt, wird das Zeichen Z 278 bzw. Z 282 von dem Anzeigequerschnitt angezeigt, bei dem die zulässige Höchstgeschwindigkeit aufgehoben wird. Wird die aktuell geltende zulässige Höchstgeschwindigkeit auf dem Streckenabschnitt deaktiviert, so erlöschen die WZG nacheinander in Fahrtrichtung zeitlich versetzt. Der Anzeigequerschnitt, der die Zeichen Z 278 bzw. Z 282 anzeigt, erlischt als letzter Anzeigequerschnitt. Es kann dabei nicht in jedem Fall sichergestellt werden, dass jeder Fahrer, dem die zulässige Höchstgeschwindigkeit angezeigt wurde, auch die Zeichen Z 278 bzw. Z 282 angezeigt bekommt. Diese Situation tritt dann ein, wenn ein Teil dieser Fahrer den letzten aktiven Anzeigequerschnitt zu spät erreicht [BMV97a]. Für diese Fahrzeugführer gilt streng genommen die zuletzt gezeigte Höchstgeschwindigkeit weiterhin [Mül12, SVO13].

Den PTB-A 12.01 ist zu entnehmen, dass die Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte, die an eine WVA gekoppelt betrieben werden, eine ausgeschaltete WVZ-Schilderbrücke als Aufhebung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit interpretieren müssen, sofern neben der WVA keine feste Beschilderung vorhanden ist. Dieser Fakt ist aber nur den wenigsten Autofahrern bekannt, da die PTB-A 12.01 eine technische Richtlinie darstellen, die sich nur an Fachexperten richtet.

In Frage 15 meinen 53,19 % der Befragten, dass nach einer Auffahrt die zulässige Höchstgeschwindigkeit aufgehoben ist, sofern keine erneute Beschilderung erfolgt. Doch die Beschlüsse des Oberlandesgerichts Hamm und des Bayerischen Obersten Landesgerichts





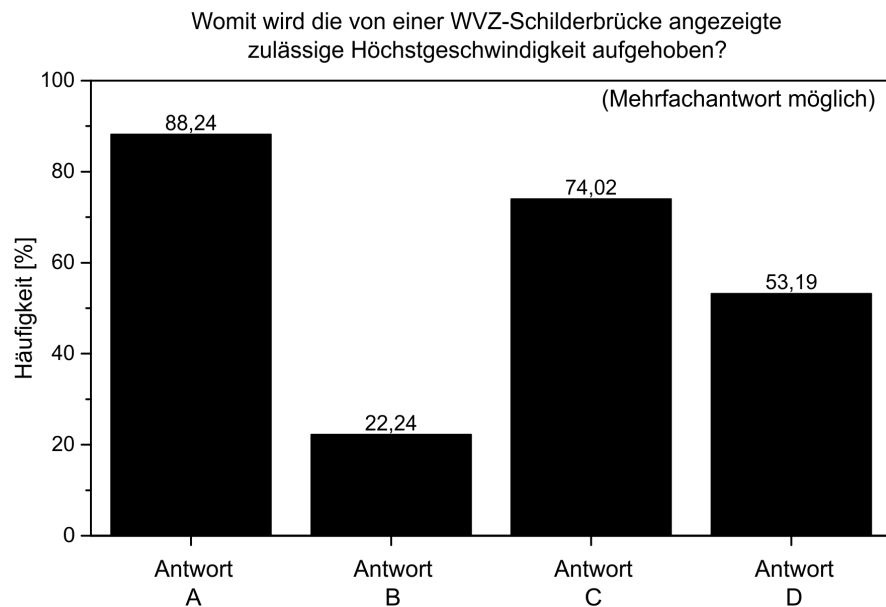
**Abbildung B.4.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 14. Antwort **A**: Rastplatz Essehof in Richtung Hannover. Antwort **B**: Rastplatz Essehof in Richtung Berlin. Antwort **C**: Anschlussstelle Braunschweig-Hafen in Richtung Berlin. Antwort **D**: Raststätte Zweidorfer Holz in Richtung Berlin. Antwort **E**: Rastplatz Röhre in Richtung Hannover. Antwort **F**: Ich kenne keinen der genannten Standorte.

zeigen, dass eine Autobahnauffahrt allgemein nicht dazu führt, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit aufgehoben wird [OLG96, OLG98].

Die Bedeutung des Aufhebungszeichens (Z 278, Z 282) bzw. die Gleichberechtigung von WVZ und Blechschild sind der großen Mehrheit der Befragten 88,24 % bzw. 74,02 % bekannt. Die Gleichrangigkeit von WVZ und Blechschild wird in der Straßenverkehrsordnung und den Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen aber nicht explizit beschrieben (vgl. §§ 39 und 41 in [SVO13] und Abschnitt 4 in [BMV97a]).

Die Frage 15 gab den Befragten zusätzlich die Möglichkeit eigene Antworten zu formulieren. Als weitere Aufhebungsszenarien wurden polizeiliche Anordnungen oder das offensichtliche Ende einer Gefahrenstelle genannt. Zudem wird von einigen Teilnehmern Unmut im Umgang mit ausgeschalteten WVZ beklagt.

Die Ergebnisse von Frage 15 – teilweise vorherrschende Unwissenheit über die Bedeutung einer ausgeschalteten WVZ-Schilderbrücke – lassen den Schluss zu, dass auf Autobahnabschnitten mit WVA selbst dann Bremsmanöver am Überwachungsort durchgeführt werden, wenn gar keine zulässige Höchstgeschwindigkeit angezeigt wird. Die Verkehrsfussmessungen im Abschnitt 5.2.2 konnten dies bestätigen.

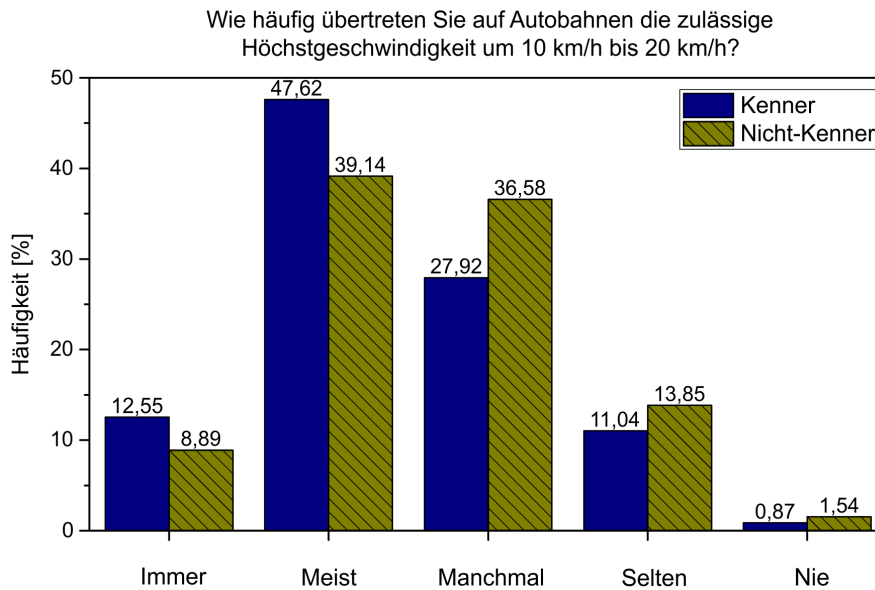


**Abbildung B.5.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 15. Antwort **A**: Die nächste WVZ-Schilderbrücke stellt das Aufhebungszeichen dar. Antwort **B**: Die nächste WVZ-Schilderbrücke ist ausgeschaltet. Antwort **C**: Ein Blechschild am Straßenrand hebt die bisher zulässige Höchstgeschwindigkeit auf. Antwort **D**: Nach dem Passieren einer Autobahnauffahrt ist die bisher zulässige Höchstgeschwindigkeit automatisch aufgehoben, wenn nicht anders beschildert.

### B.3. Untersuchung des Einflusses der Routine der Teilnehmer

Für die Untersuchung des Einflusses der Routine auf die Umfrageergebnisse wurden die Teilnehmer in Kenner und Nicht-Kenner unterteilt (siehe Abschnitt 4.1). Anschließend wurden alle Fragenkomplexe der Umfrage für beide Gruppen erneut betrachtet. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Im Bewusstsein über die eigene Geschwindigkeit (Frage 1) und die zulässige Höchstgeschwindigkeit (Fragen 4 und 5) unterscheiden sich Kenner und Nicht-Kenner laut Umfrage nicht signifikant – unabhängig von der Art der Beschilderung. Bei der Häufigkeit von Übertretungen von mehr als 20 km/h ist dies auch der Fall (Teil 2 der Fragen 2 und 3). Übertretungen zwischen 10 km/h und 20 km/h werden laut Umfrage (Teil 1 der Fragen 2 und 3) hingegen von Kennern, sowohl auf Autobahnen allgemein als auch auf Autobahnabschnitten mit WVA, signifikant häufiger begangen als von Nicht-Kennern (Abbildungen B.6 und B.7). Für Autobahnen allgemein geben 60,17 % der Kenner an die zulässige Höchstgeschwindigkeit „immer“ bzw. „meist“ um 10 km/h bis 20 km/h zu übertreten. Nur 48,03 % der Nicht-Kenner äußern sich für Autobahnen allgemein in dieser Form. Auf Autobahnabschnitten mit WVA übertreten laut Umfrage 48,70 % der Kennern „immer“ oder „meist“ die zulässige Höchstgeschwindigkeit um 10 km/h bis



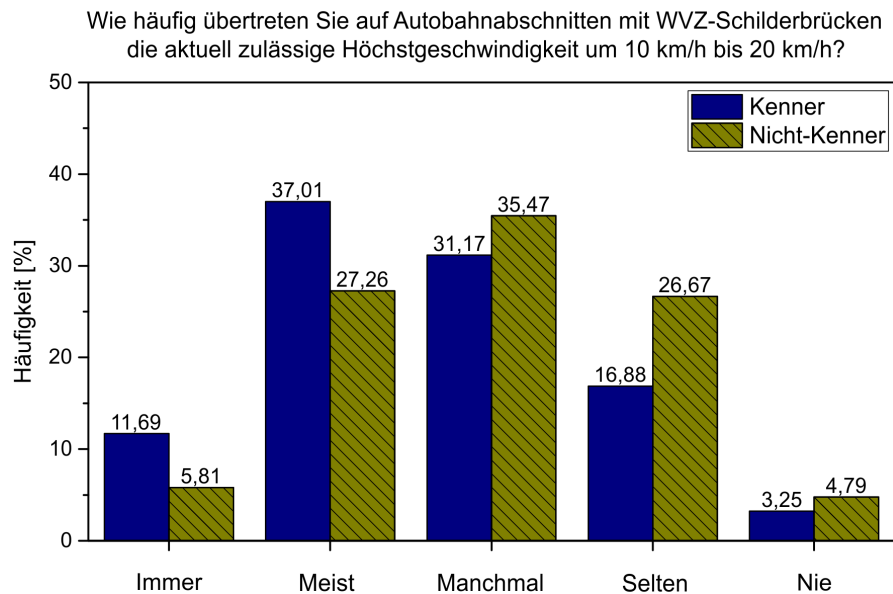
**Abbildung B.6.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Kennern und Nicht-Kennern in Frage 2 Teil 1.

20 km/h, während bei den Nicht-Kennern laut Umfrage nur 33,07 % in dieser Häufigkeit diese Übertretungen begehen. Diese Ergebnisse passen teilweise zu den Ergebnissen in [Fil94, Qui99a, Gol07]. Dort konnte mit Hilfe von Umfragen und gleichzeitigen Verkehrsflussmessungen gezeigt werden, dass Berufsfahrer grundsätzlich eher zu Übertretungen neigen als andere Autofahrer.

Die Umfrageergebnisse zeigen weiterhin, dass die Routine der Kenner im Umgang mit dem Überwachungsfall zu keiner signifikant anderen Zustimmung bezüglich der spontanen Bremsmanöver führt (Frage 6). Es ist an dieser Stelle nicht auszuschließen, dass sich hier zwei gegenläufige Effekte gerade kompensieren. Die erhöhte Routine könnte hier die häufigeren Übertretungen gerade ausgleichen. Bezüglich der Gründe für Bremsmanöver im Überwachungsfall ist jedenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen Kennern und Nicht-Kennern zu finden (Frage 7).

Die Kenner geben in Frage 8 deutlich häufiger an, dass sie Abbremsmanöver benachbarter Fahrzeugführer sehen. In Frage 8 stimmten 89,40 % der Kenner und 77,61 % der Nicht-Kenner „voll und ganz“ bzw. „überwiegend“ zu. Auf Grund ihrer häufigen Begegnungen mit Überwachungsgeräten ist bei den Kennern diese Beobachtung wahrscheinlich präsenter im Gedächtnis als bei den Nicht-Kennern.

In ihren Aussagen bezüglich der Reaktion an Hinweisschildern (Frage 9), der wahrgenommenen Reaktionen anderer Autofahrer an Hinweisschildern (Frage 10) und der Einstel-



**Abbildung B.7.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Kennern und Nicht-Kennern in Frage 3 Teil 1.

lung zu Hinweisschildern (Frage 13) unterscheiden sich Kenner und Nicht-Kenner nicht signifikant. Auch bezüglich der Meinung zur Befolgungsgraderhöhung mittels stationärer Geschwindigkeitsüberwachung (Frage 12) konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Kennern und Nicht-Kennern festgestellt werden.

Die Häufigkeitsverteilungen der Antworten in Frage 11, welche die Akzeptanz der WVZ adressierte, unterscheiden sich zwischen Kennern und Nicht-Kennern. Es zeigt sich, dass laut Umfrage die Kenner weniger von den Schaltzuständen der WVZ überzeugt sind als die Nicht-Kenner. Während 42,68 % der Nicht-Kenner in Frage 11 „voll und ganz“ bzw. „überwiegend“ zustimmen, beträgt dieser Anteil bei den Kennern nur 33,77 %. Wahrscheinlich haben die Kenner bereits öfters unplausible Schaltzustände erlebt, die als Negativbeispiele bei ihnen besser in Erinnerung geblieben sind.

Der Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von Kennern und Nicht-Kennern in Frage 14 kommt wie erwartet zu dem Ergebnis, dass den Kennern die Überwachungsorte auf der A2 besser bekannt sind als den Nicht-Kennern.

In der Regelkenntnis (Frage 15) konnten auch signifikante Unterschiede zwischen Kennern und Nicht-Kennern gefunden werden. So wissen die Kenner besser als die Nicht-Kenner, dass ein dargestelltes Aufhebungszeichen die zulässige Höchstgeschwindigkeit aufhebt. Von den Kennern wählten 91,34 % diese Antwort aus. Bei den Nicht-Kennern waren es entsprechend nur 87,01 %. Die Kenner irren sich aber auch häufiger beim Umgang mit

ausgeschalteten WVZ-Schilderbrücken. Während 27,27 % der Kenner denken, dass eine ausgeschaltete WVZ-Schilderbrücke die zulässige Höchstgeschwindigkeit aufhebt, geben bei den Nicht-Kennern nur 20,26 % dies so an.

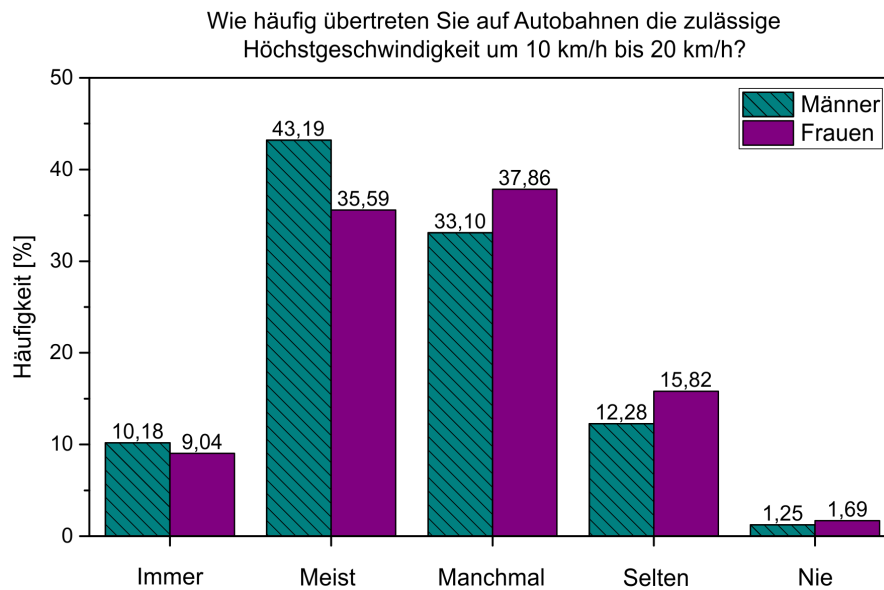
## **B.4. Untersuchung des Einflusses des Geschlechts der Teilnehmer**

Mit Hilfe der Angaben der Teilnehmer im Fragenkomplex Persönliches konnten diese nach Männern und Frauen separiert werden. Im Folgenden wird untersucht, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede sich zwischen Männern und Frauen in den Antworthäufigkeiten der Umfrage finden lassen.

Die Auswertung der Fragen 1, 4 und 5, unter Berücksichtigung des Geschlechts des jeweiligen Teilnehmers, ergab, dass sich Männer und Frauen hinsichtlich ihres Bewusstseins über die eigene Geschwindigkeit und die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht signifikant unterscheiden. Dies gilt sowohl für Autobahnen allgemein als auch für Streckenabschnitte mit WVA.

Für die Fragen 2 und 3 zeigte die geschlechtsspezifische Auswertung, dass Männer im Vergleich zu Frauen laut Umfrage häufiger Übertretungen im Bereich zwischen 10 km/h und 20 km/h begehen (Abbildungen B.8 und B.9). Für Autobahnabschnitte allgemein gaben 53,37 % der Männer und 44,63 % der Frauen an die zulässige Höchstgeschwindigkeit „immer“ oder „meist“ um 10 km/h bis 20 km/h zu übertreten. Auf Autobahnabschnitten mit WVA wird die zulässige Höchstgeschwindigkeit laut Umfrage von 39,98 % der Männer und 28,53 % der Frauen „immer“ oder „meist“ übertreten. Für den Übertretungsbereich von mehr als 20 km/h konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Männern und Frauen gefunden werden. Es sei angemerkt, dass bei den Frauen der Anteil der Kenner 20,05 % beträgt und bei den Männern 30,59 %. Der hier dargestellte Unterschied zwischen Frauen und Männern ist daher teilweise auf die unterschiedliche Routine zurückzuführen. Die Ergebnisse in der Literatur bezüglich der Abhängigkeit zwischen Geschlecht und Häufigkeit von Geschwindigkeitsübertretungen sind widersprüchlich. In [Hol96, Law07, Str07, Tay09, Ant12, Ana16, Sch16] wurde festgestellt, dass männliche Fahrer eher zu Geschwindigkeitsübertretungen neigen als weibliche Fahrer. Fildes et al., Quimby et al. und Haglund et al. konnten hingegen keinen signifikanten Einfluss des Geschlechts auf die Übertretungshäufigkeit finden [Fil94, Qui99a, Hag00].

Die Verteilungen der Antworten von Männern und Frauen in den Fragen 6 und 8 bis 10 unterscheiden sich nicht signifikant. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass das Verhalten im Überwachungsfall (Frage 6), die Wahrnehmung der Fahrmanöver anderer im Überwachungsfall (Frage 8 und Frage 10) und der Umgang mit Hinweisschildern (Frage 9) nicht geschlechtsspezifisch sind. Für die Frage 6 ist die fehlende Signifikanz bemerkenswert, da ja festgestellt werden konnte, dass laut Umfrage Männer häufiger übertreten.



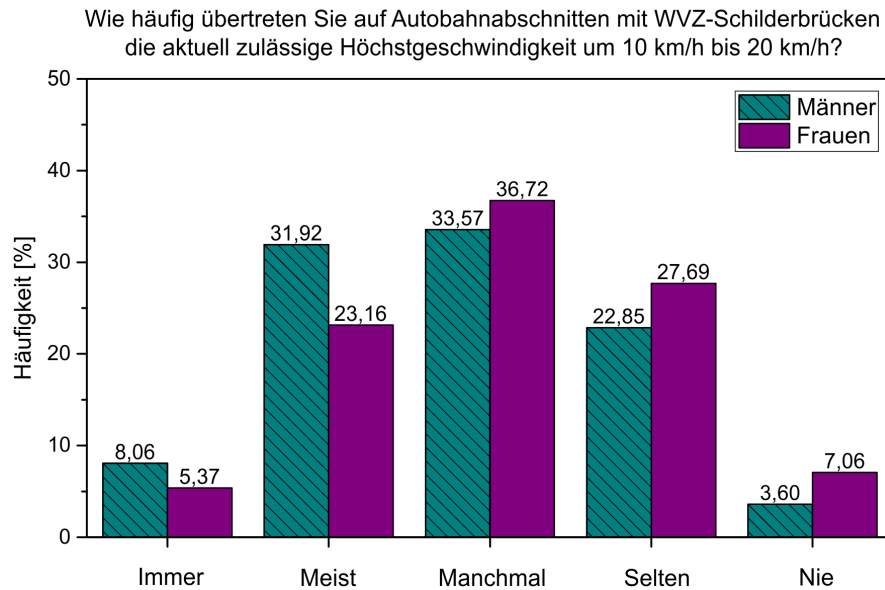
**Abbildung B.8.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Männern und Frauen in Frage 2 Teil 1.

In den Gründen zu den spontan durchgeführten Bremsmanövern im Überwachungsfall unterscheiden sich Männer und Frauen nur hinsichtlich des Vertrauens in die Überwachungstechnik signifikant (Frage 7). Männer geben signifikant häufiger an (23,44 %), dass sie bremsen, weil sie der Überwachungstechnik nicht vertrauen. Bei den Frauen beträgt der entsprechende Anteil nur 4,17 %.

Die Überzeugung von der Sinnhaftigkeit der mittels WVZ angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten ist vermutlich geschlechtsspezifisch (Frage 11). Laut Umfrage sind Männer signifikant weniger davon überzeugt als Frauen, dass die angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten von WVZ-Schilderbrücken nachvollziehbar und vernünftig sind. Von den Männern stimmten hier 38,75 % „voll und ganz“ bzw. „überwiegend“ zu. Bei den Frauen betrug dieser Anteil hingegen 45,21 %. Auch hier sei angemerkt, dass die Gruppe der Männer deutlich mehr Kenner besitzt als die Gruppe der Frauen und bereits in der Auswertung zur Routine gezeigt wurde, dass Kenner von der Sinnhaftigkeit signifikant weniger überzeugt sind.

Die Meinung zur Befolungsgraderhöhung mittels Geschwindigkeitsüberwachung ist unter Männern und Frauen in gleicherweise ausgeprägt (Frage 12). Hier konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden.

Die These, dass Hinweisschilder die Verkehrssicherheit vermindern, weil sie auf den konkreten Überwachungsort hinweisen, wird von Männern signifikant häufiger abgelehnt als

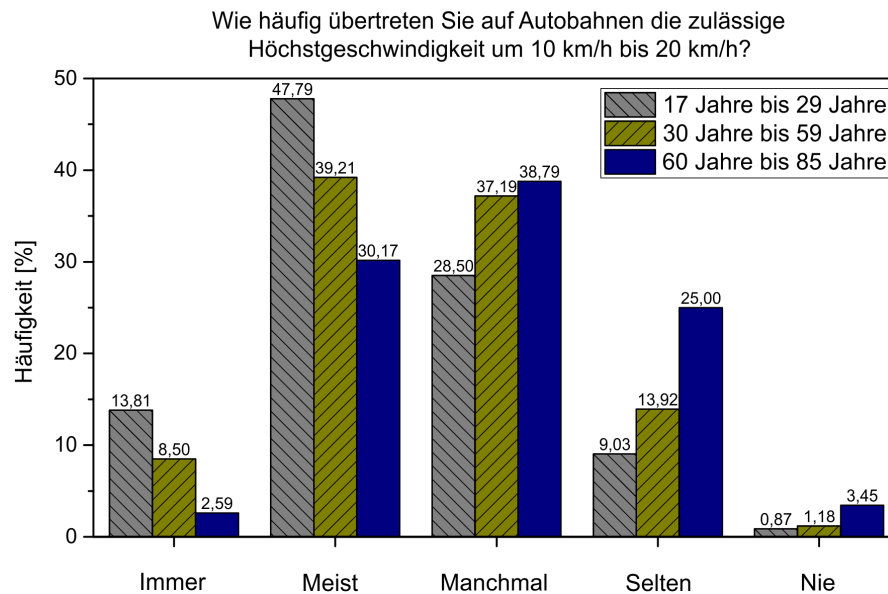


**Abbildung B.9.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Männern und Frauen in Frage 3 Teil 1.

von Frauen (Frage 13). 55,05 % der Männer lehnten diese These ab. Dem gegenüber standen 46,33 % der Frauen.

In der Kenntnis über die auf der A2 vorhandenen Orte stationärer Überwachung unterscheiden sich die Antworten der Männer und Frauen teilweise signifikant (Frage 14). Dieses Ergebnis ist zweifellos eine Folge des größeren Kenneranteils unter den Männern.

In der Regelkunde unterscheiden sich Männer und Frauen ebenfalls teilweise signifikant. Bei der Frage womit die von einer WVZ-Schilderbrücke angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit aufgehoben wird (Frage 15) entschieden sich korrekterweise 90,14 % der Männer und 81,36 % der Frauen für das Aufhebungszeichen. Auch wenn dieser Unterschied zwischen Männern und Frauen hier signifikant ist, so ist dieses Wissen in beiden Gruppen weit verbreitet. In Frage 15 zeigte sich weiterhin, dass Frauen im Vergleich zu Männern signifikant weniger davon ausgehen, dass hinter einer Auffahrt die zulässige Höchstgeschwindigkeit automatisch aufgehoben wird. Während sich hier 55,56 % der Männer irrten, taten dies bei den Frauen nur 44,63 %. Die Gleichberechtigung von Blechschild und WVZ scheint bei den Männern wiederum besser bekannt zu sein. Von den Männern erkannten dies 76,84 % korrekt. Bei den Frauen betrug der entsprechende Anteil 63,84 %. In dem Punkt, dass eine ausgeschaltete WVZ-Schilderbrücke die zulässige Höchstgeschwindigkeit aufhebt, täuschten sich bei den Männern und den Frauen vergleichbare Anteile der Teilnehmer.



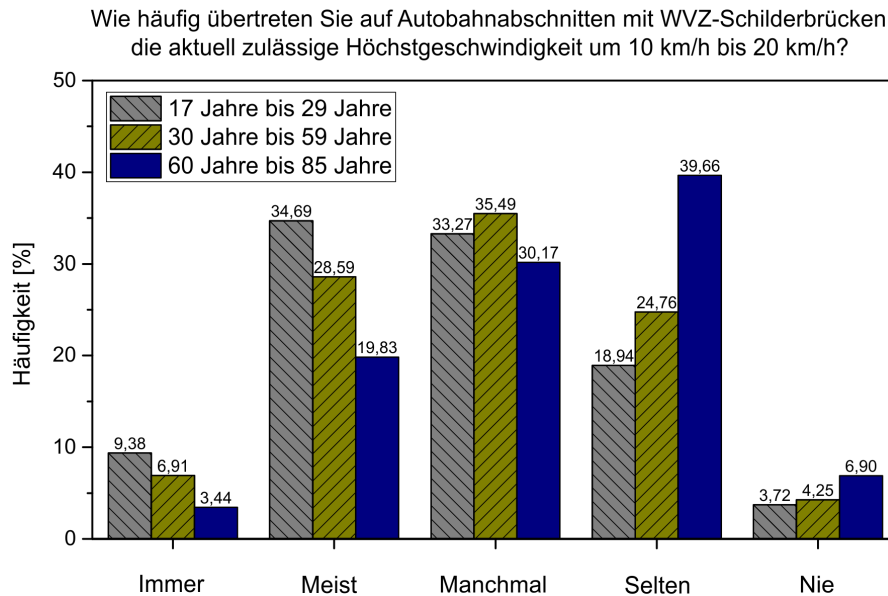
**Abbildung B.10.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung der drei Altersklassen in Frage 2 Teil 1.

## B.5. Untersuchung des Einflusses des Alters der Teilnehmer

Für die Betrachtung des Einflusses des Alters der Teilnehmer auf die Umfrageergebnisse wurden die Teilnehmer in 3 Altersklassen aufgeteilt. Die jüngste Altersklasse umfasste Teilnehmer mit einem Alter von 17 Jahren bis 29 Jahren. Die mittlere Altersklasse deckte Teilnehmer mit einem Alter von 30 Jahren bis 59 Jahren ab. Die älteste Klasse beinhaltete Teilnehmer von 60 Jahren bis 85 Jahren. Zur jüngsten Altersklasse zählten 565 Teilnehmer. In die mittlere Altersklasse konnten 941 Teilnehmer eingruppiert werden. Die höchste Altersklasse bestand aus 116 Teilnehmern. 10 Teilnehmer hatten unplausible Altersangaben gemacht und wurden hier daher nicht berücksichtigt. Für die Untersuchung der Signifikanz des Alterseinflusses wurden für jede Frage die Antworthäufigkeiten der jüngsten Altersklasse mit den Antworthäufigkeiten der mittleren Altersklasse verglichen. Die älteste Altersklasse wurde bei der Signifikanzbetrachtung nicht berücksichtigt, da diese einen kleinen Stichprobenumfang besaß. Die Prozentsätze für Kenner und Nicht-Kenner bzw. Männer und Frauen in der jüngsten und der mittleren Altersklasse waren nahezu identisch. Es konnte somit ausgeschlossen werden, dass die beiden Einflüsse Routine und Geschlecht die Ergebnisse hier hätten verfälschen können.

Die Auswertung der Fragen 1, 4 und 5, hinsichtlich des Einflusses des Alters der Teilnehmer, ergab, dass laut Umfrage das Bewusstsein über die eigene Geschwindigkeit und das Bewusstsein über die zulässige Höchstgeschwindigkeit – unabhängig von der Art der Beschilderung – nicht signifikant vom Alter der Teilnehmer abhängen.





**Abbildung B.11.:** Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung der drei Altersklassen in Frage 3 Teil 1.

Bei den Fragen 2 und 3 konnte hingegen jeweils im Teil 1 ein signifikanter Alterseinfluss nachgewiesen werden. Es stellte sich heraus, dass junge Teilnehmer nach eigener Aussage signifikant häufiger Geschwindigkeitsübertretungen von 10 bis 20 km/h begehen (Abbildungen B.10 und B.11). Im Teil 1 von Frage 2 gaben 61,60 % der jüngsten Altersklasse an, die zulässige Höchstgeschwindigkeit „immer“ oder „meist“ um 10 km/h bis 20 km/h zu übertreten. Teilnehmer, die zur mittleren Altersklasse gehören, machten diese Angabe nur in 47,71 % der Fälle. Für den Teil 1 von Frage 3 ergaben sich entsprechend die Anteile 44,07 % und 35,50 %. In den Veröffentlichungen von Fildes et al., Holland et al., Quimby et al., Goldenbeld et al., Lawpoolsri et al., Tay und Antov et al. konnte bereits gezeigt werden, dass junge Fahrer deutlich häufiger zu Geschwindigkeitsübertretungen neigen als ältere Fahrer [Fil94, Hol96, Qui99a, Qui99b, Gol07, Law07, Tay09, Ant12]. Die hier gefundenen Ergebnisse sind damit in Übereinstimmung mit der Literatur. Bei der Häufigkeit von Übertretungen mit mehr als 20 km/h konnte kein signifikanter Einfluss des Alters festgestellt werden.

Die Häufigkeitsverteilungen der Fragen 6 bis 11 zeigten keinen signifikanten Alterseinfluss. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich junge und ältere Autofahrer nicht bezüglich des Bremsverhaltens im Überwachungsfall (Frage 6), den Gründen zu den durchgeführten Bremsmanövern (Frage 7) und den beobachteten Bremsmanövern Anderer (Frage 8) unterscheiden. Außerdem kann damit angenommen werden, dass sich junge und ältere Autofahrer nicht in den Fahrmanövern, die sie in Gegenwart von Hinweisschildern durchführen (Frage 9) bzw. die sie von anderen Autofahrern in Gegenwart

von Hinweisschildern wahrnehmen (Frage 10), unterscheiden. Auf Grund der Ergebnisse bei Frage 11, ist zudem anzunehmen, dass sowohl junge als auch ältere Autofahrer die Schaltprogramme der WVA vorwiegend als sinnhaftig erachten.

Die Häufigkeitsverteilungen in Frage 12 zeigten einen signifikanten Alterseinfluss. Jüngere Autofahrer scheinen demnach weniger von der Befolgungsgraderhöhung mittels Geschwindigkeitsüberwachung überzeugt zu sein als ältere Autofahrer. Während 40,6 % der Teilnehmer, die zur mittleren Altersgruppe gehörten, in Frage 12 „voll und ganz“ bzw. „überwiegend“ zustimmten, taten dies ihnen nur 30,44 % der jüngsten Teilnehmer gleich.

Die These, dass Hinweisschilder die Verkehrssicherheit vermindern, weil sie auf den konkreten Überwachungsort hinweisen, wird von allen Altersklassen im gleichen Maße abgelehnt (Frage 13).

In der Kenntnis über die auf der A2 vorhandenen Orte stationärer Überwachung unterscheiden sich die drei Altersklassen teilweise signifikant voneinander (Frage 14). Die Gruppe der jungen Autofahrer kennt die vorhandenen Standorte, nach eigener Aussage, teilweise deutlich besser als die beiden anderen Altersgruppen. In der Regelkunde (Frage 15) konnte kein signifikanter Alterseinfluss gefunden werden.

## B.6. Zusammenfassung der weiteren Umfrageergebnisse

Die Auswertung der Fragenkomplexe Meinung und Kenntnis in diesem Anhang hat gezeigt, dass die Schaltzustände der WVA von den Befragten vorwiegend als vernünftig und nachvollziehbar angesehen werden. Zudem stuft die Mehrheit der Teilnehmer Hinweisschilder, die eine Überwachungssituation ankündigen, als verkehrssichernd ein. Im Umgang mit ausgeschalteten WVZ-Schilderbrücken herrscht teilweise Unsicherheit unter den Befragten. Es wird daher auch Unmut über ausgeschaltete WVZ-Schilderbrücken geäußert.

Die Auswertung der Umfrageergebnisse unter Berücksichtigung der Routine, des Geschlechts und des Alters der Teilnehmer zeigte, dass diese drei Faktoren laut Umfrage keinen Einfluss auf das Geschwindigkeitsbewusstsein und die Reaktion im Überwachungsfall haben. In der Häufigkeit von Geschwindigkeitsübertretungen im Bereich von 10 km/h bis 20 km/h zeigte sich aber bei allen drei Faktoren ein signifikanter Einfluss. So gaben die Kenner signifikant häufiger als die Nicht-Kenner an, dass sie Geschwindigkeitsübertretungen von 10 km/h bis 20 km/h begehen. Im Vergleich der Geschlechter übertreten Männer laut Umfrage signifikant häufiger in diesem Umfang als Frauen. Außerdem scheinen junge Autofahrer signifikant häufiger eine solche Übertretung zu begehen als ältere Autofahrer.

## C. Statistische Aspekte der Auswertung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Messreihen ausgewertet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Bei diesen Vergleichen wurde mit Hilfe statistischer Verfahren beurteilt, ob sich die Ergebnisse der Messreihen signifikant unterscheiden oder nicht. In diesem Kapitel werden die dafür verwendeten Methoden kurz vorgestellt.

### C.1. Parameterschätzung

In statistischer Hinsicht stellen die im Rahmen der Verkehrsflussmessungen gewonnenen Daten  $x_i$  Stichproben von unbekannten Grundgesamtheiten dar. Eine Grundgesamtheit wird in der Statistik durch ihre Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion vollständig charakterisiert. Diese Verteilungsfunktion ist meist unbekannt und besitzt die Parameter Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$ . Mit Hilfe einer beliebigen Stichprobe, gezogen aus der Grundgesamtheit, und geeigneten Schätzfunktionen können Näherungswerte für die unbekannten Parameter, Erwartungswert und Varianz, angegeben werden. Eine optimale Schätzfunktion für den Erwartungswert  $\mu$  der Grundgesamtheit stellt der Mittelwert  $\bar{x}$  der  $n$  Stichprobenwerte dar [Pap11]:

$$\mu \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad . \quad (C.1)$$

Für die Varianz  $\sigma^2$  der Grundgesamtheit existiert die optimale Schätzfunktion  $s^2$  [Pap11]:

$$\sigma^2 \approx s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad . \quad (C.2)$$

Die Zufallsvariablen  $x_i$  und  $\bar{x}$  folgen alle der gleichen unbekannten Verteilung der Grundgesamtheit. Aus dem zentralen Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung folgt jedoch, dass für  $n \rightarrow \infty$  die Schätzfunktion  $\bar{x}$  um den Erwartungswert  $\mu$  mit der Varianz  $\sigma^2/n$  näherungsweise normalverteilt ist [Pap11]. Das heißt, dass für einen genügend großen Stichprobenumfang angenommen werden kann, dass  $\bar{x}$  einer Normalverteilung folgt und die Varianz dieser Normalverteilung mit zunehmendem Stichprobenumfang gegen Null strebt.

Es besteht die Möglichkeit die Sicherheit einer durchgeführten Parameterschätzung mit Hilfe eines sogenannten Vertrauensintervalls (Konfidenzintervall) anzugeben. Die Bestimmung des Vertrauensintervalls ist dabei nur möglich, wenn die Art der Verteilungsfunktion der zugehörigen Schätzfunktion bekannt ist. Folgt beispielsweise die Schätzfunktion für

den Mittelwert einer Normalverteilung und ist die Standardabweichung  $\sigma$  der Grundgesamtheit exakt bekannt, so berechnet sich das Vertrauensintervall für den Erwartungswert  $\mu$  nach:

$$\bar{x} - c \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + c \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad , \quad (\text{C.3})$$

wobei die Konstante  $c$  das Quantil der Standardnormalverteilung darstellt und abhängig von der gewünschten Irrtumswahrscheinlichkeit ist [Pap11]. Falls die Schätzfunktion für den Mittelwert einer Normalverteilung folgt, die Standardabweichung  $\sigma$  der Grundgesamtheit aber nicht exakt bekannt ist, kann diese mittels  $\sqrt{s^2}$  abgeschätzt werden. In diesem Fall ist dann aber nicht das Quantil der Standardnormalverteilung zu verwenden, sondern das entsprechende Quantil der Student-t-Verteilung. Da die Student-t-Verteilung für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Standardnormalverteilung strebt, darf bei umfangreichen Stichproben (Faustregel:  $n \geq 30$ ) für die Berechnung der Konstante  $c$  die Standardnormalverteilung verwendet werden [Pap11].

Wie bereits angesprochen, strebt die Verteilungsfunktion der Schätzfunktion  $\bar{x}$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Normalverteilung. Deshalb darf Gleichung (C.3) für die Bestimmung des Vertrauensintervalls verwendet werden, auch wenn die Zufallsvariable  $x_i$  nicht normalverteilt ist, sofern der Stichprobenumfang genügend groß ist [Pap11]. Oftmals werden Stichprobenumfänge größer 30 als genügend groß erachtet.

## C.2. Parametertests

Das in Gleichung (C.3) beschriebene Vertrauensintervall bildet die Grundlage für statistische Prüfverfahren. Diese Prüfverfahren, auch Parametertest genannt, dienen der Überprüfung statistischer Hypothesen bezüglich unbekannter Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Zufallsvariablen oder einer Grundgesamtheit. Bei einem Parametertest wird mit Hilfe einer Stichprobe und einer geeigneten Schätzfunktion für den unbekannten Parameter geprüft, ob der hypothetisch angenommene Wert für den unbekannten Parameter von der Stichprobe gestützt wird oder nicht. Das heißt, es wird eine Aussage darüber getroffen, ob der hypothetisch angenommene Wert innerhalb des Vertrauensintervalls des auf Basis der Stichprobe geschätzten Wertes liegt. Falls dies der Fall ist, dann stützt die Stichprobe die getroffene statistische Hypothese. Anderenfalls deutet die Stichprobe daraufhin, dass sich der hypothetisch angenommene Wert und der geschätzte Wert nicht zufällig unterscheiden und die Hypothese wahrscheinlich falsch ist.

Wenn man diese Parametertests für zwei verschiedene Stichproben durchführt und die gewonnenen Vertrauensintervalle miteinander vergleicht, spricht man auch von einem Differenztest. Mit Hilfe eines Differenztests kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob sich die zu den beiden Stichproben zugehörigen Grundgesamtheiten bezüglich eines ausgewählten Parameters signifikant unterscheiden oder nicht. Genau diese Frage spielt bei der Auswertung der Verkehrsdaten eine wichtige Rolle. Die Signifikanz trifft eine Aussage darüber, ob der gefundene Unterschied zufällig ist, also auf Grund der zufällig

gesammelten Daten entstanden ist, oder ob dieser Unterschied keine zufällige Ursache hat und damit reproduzierbar ist. Mit Hilfe von Differenztests kann daher untersucht werden, ob sich zum Beispiel die Geschwindigkeitsmittelwerte zweier Stichproben signifikant unterscheiden und dieser signifikante Unterschied auf einen bestimmten Einflussfaktor (z. B. Geschwindigkeitsüberwachung) zurückgeführt werden kann.

Bei der Durchführung von Differenztests muss zwischen abhängigen und unabhängigen Stichproben unterschieden werden. Zwei Stichproben gelten als abhängig, wenn sie exakt den gleichen Umfang besitzen und jeder Wert der einen Stichprobe mit genau einem Wert aus der anderen Stichprobe korrespondiert. Diese beiden Bedingungen sind für die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Stichproben nie erfüllt, weshalb die Stichproben als voneinander unabhängig zu betrachten sind. Es folgt für zwei unabhängige Stichproben mit genügend großem Stichprobenumfang [Pap11]:

$$s^2 = \frac{(n_x - 1)s_x^2 + (n_y - 1)s_y^2}{n_x + n_y - 2} \quad (\text{C.4})$$

$$\hat{t} = \sqrt{\frac{n_x n_y}{n_x + n_y}} \cdot \frac{\bar{x} - \bar{y}}{s} \quad (\text{C.5})$$

$$-c \leq \hat{t} \leq c \quad . \quad (\text{C.6})$$

Die Mittelwerte  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  und die Schätzfunktionen der Standardabweichungen  $s_{x/y}$  können mit Hilfe der Gleichungen (C.1) und (C.2) bestimmt werden. Die Stichprobenumfänge werden hier mit  $n_x$  bzw.  $n_y$  bezeichnet. Der Parameter  $c$  ist abhängig von der Irrtumswahrscheinlichkeit und bestimmt sich durch das entsprechende Quantil der Student-t-Verteilung mit  $n_x + n_y - 2$  Freiheitsgraden. Fällt  $\hat{t}$  nicht in das Intervall von Gleichung (C.6), so sind beide Mittelwerte signifikant voneinander verschieden.

### C.3. Weitere statistische Tests

Die bei den Verkehrsflussmessungen gewonnenen Stichproben zeichnen sich nicht nur durch ihre Mittelwerte und Standardabweichungen aus, sondern besitzen auch Informationen über das Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeugführer und über weitere Parameter des Verkehrsflusses. Um zu überprüfen, ob sich die Stichproben bezüglich dieser Punkte unterscheiden, bietet sich der  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest an. Dieser Test bewertet den Einfluss eines Parameters auf die Häufigkeitsverteilung einer Stichprobe. Dafür wird eine Prüfvariable verwendet, die einer  $\chi^2$ -Verteilung folgt. Diese Prüfvariable lässt sich über eine Kreuztabelle aus den verschiedenen Häufigkeitsverteilungen der Stichprobe berechnen. Wenn die Prüfvariable in das Vertrauensintervall fällt, so unterscheiden sich die einzelnen Häufigkeitsverteilungen nicht signifikant voneinander. Das heißt, der Einfluss des abgeprüften Parameters ist nicht nachweisbar [Pap11]. Umgekehrt gilt, wenn sich ein signifikanter Unterschied einstellt, dann wirkt der abgeprüfte Parameter nachweislich auf die Stichprobe ein.

Neben dem  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest kann auch der sogenannte  $\chi^2$ -Anpassungstest durchgeführt werden, bei diesem Test handelt es sich um die Prüfung, ob die in einer Stichprobe enthaltene Verteilung einer theoretisch angenommenen Verteilung entspricht. Das heißt, es wird geprüft, ob sich die Stichprobe von der erwarteten Verteilung signifikant unterscheidet oder nicht [Pap11]. Sowohl der  $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest als auch der  $\chi^2$ -Anpassungstest werden in dieser Arbeit für die Bewertung der Ergebnisse der Verkehrsflussmessungen und der Umfrage verwendet.

## D. Umfragebogen

### Einleitung

Auf einigen Autobahnabschnitten in Deutschland werden dem Fahrzeugführer die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit und Gefahrenhinweise mit Hilfe von Wechselverkehrszeichen (WVZ) angezeigt. In Abbildung D.1 sehen Sie eine typische WVZ-Schilderbrücke.



**Abbildung D.1.:** (Groß) Typische WVZ-Schilderbrücke. (Klein links oben) Eingefügt ist die Abbildung des WVZ für die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 80 km/h.

Auf diesen Autobahnabschnitten mit WVZ-Schilderbrücken wird auch Geschwindigkeitsüberwachung betrieben. Vorwiegend wird diese Überwachung mit stationären (ortsfest installierten) Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten durchgeführt. In Abbildung D.2(a) wird ein solches Geschwindigkeitsüberwachungsgerät beispielhaft dargestellt.

Auf der A2 waren bis vor kurzem Hinweisschilder installiert, die auf die Standpunkte der stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte hingewiesen haben. In Abbildung D.2(b) wird ein solches Hinweisschild beispielhaft dargestellt. In der folgenden Umfrage wird auf die hier genannten Systeme und Anzeigen eingegangen.



(a)



(b)

**Abbildung D.2.:** Geschwindigkeitsüberwachungsgerät (a) und Hinweisschild (b), welches auf den Standort des stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgerätes hinweist.

## Fragenteil

### Geschwindigkeitswahl

1. Wie häufig ist Ihnen Ihre eigene Geschwindigkeit bewusst?

Immer	Meist	Manchmal	Selten	Nie
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

2. Wie häufig übertreten Sie auf Autobahnen die zulässige Höchstgeschwindigkeit?

	Immer	Meist	Manchmal	Selten	Nie
um 10 km/h bis 20 km/h?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
um mehr als 20 km/h?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3. Wie häufig übertreten Sie auf Autobahnabschnitten mit WVZ-Schilderbrücken die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit?

	Immer	Meist	Manchmal	Selten	Nie
um 10 km/h bis 20 km/h?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
um mehr als 20 km/h?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



---

## Wahrnehmung/Gedächtnis

4. Wie häufig ist Ihnen die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnabschnitten bewusst?

Immer	Meist	Manchmal	Selten	Nie
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

5. Wie häufig ist Ihnen die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnabschnitten mit WVZ-Schilderbrücken bewusst?

Immer	Meist	Manchmal	Selten	Nie
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Reaktion

6. Wenn ich am Autobahnrand ein Geschwindigkeitsüberwachungsgerät sehe, beginne ich spontan zu bremsen!

Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

7. Wenn ich am Autobahnrand ein Geschwindigkeitsüberwachungsgerät sehe, bremsen ich, ... (Mehrfachantwort möglich)

- ☐ weil mir die zulässige Höchstgeschwindigkeit nicht ganz bewusst ist.
- ☐ weil ich mir meiner aktuellen Übertretung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bewusst bin.
- ☐ weil ich sehe wie andere Autofahrer bremsen.
- ☐ weil ich der Überwachungstechnik nicht vertraue.
- ☐ Ich bremsen nicht!
- ☐ weitere Antwortmöglichkeit:

8. Wenn andere Autofahrer am Autobahnrand ein Geschwindigkeitsüberwachungsgerät sehen, beginnen diese spontan zu bremsen!

Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

9. Wenn ich am Autobahnrand ein Hinweisschild sehe, das mit einer entsprechenden Entfernungsangabe auf ein stationäres Geschwindigkeitsüberwachungsgerät hinweist, dann prüfe ich meine eigene Geschwindigkeit und nähere mich aufmerksam dem Überwachungsgerät!

Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10. Wenn andere Autofahrer am Autobahnrand ein Hinweisschild sehen, das mit einer entsprechenden Entfernungsangabe auf ein stationäres Geschwindigkeitsüberwachungsgerät hinweist, dann bremsen diese und nähern sich aufmerksam dem Überwachungsgerät!

Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Meinung

11. Die angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf Autobahnabschnitten mit WVZ-Schilderbrücken sind nachvollziehbar und vernünftig!

Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

12. Die Geschwindigkeitsüberwachung steigert den Befolgungsgrad der mittels WVZ-Schilderbrücken angezeigten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf Autobahnabschnitten!

Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

13. Die bis vor Kurzem auf der A2 installierten Hinweisschilder vermindern die Verkehrssicherheit, da sie die Autofahrer auf den konkreten Ort der Überwachung hinweisen!

Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

---

## Wissen

14. Welche Standorte der stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte auf der A2 zwischen Helmstedt und Hannover kennen Sie?

- ☐ Rastplatz Essehof in Richtung Hannover
- ☐ Rastplatz Essehof in Richtung Berlin
- ☐ Anschlussstelle Braunschweig-Hafen in Richtung Berlin
- ☐ Raststätte Zweidorfer Holz in Richtung Berlin
- ☐ Rastplatz Röhre in Richtung Hannover
- ☐ Ich kenne keinen der genannten Standorte.

15. Womit wird die von einer WVZ-Schilderbrücke angezeigte zulässige Höchstgeschwindigkeit aufgehoben? (Mehrfachantwort möglich)

- ☐ Die nächste WVZ-Schilderbrücke stellt das Aufhebungszeichen dar.
- ☐ Die nächste WVZ-Schilderbrücke ist ausgeschaltet.
- ☐ Ein Blechschild am Straßenrand hebt die bisher zulässige Höchstgeschwindigkeit auf.
- ☐ Nach dem Passieren einer Autobahnauffahrt ist die bisher zulässige Höchstgeschwindigkeit automatisch aufgehoben, wenn nicht anders beschildert.
- ☐ weitere Antwortmöglichkeit:

## Persönliche Angaben

16. Wie alt sind Sie?

Jahre

17. Seit wie vielen Jahren besitzen Sie einen Führerschein?

Jahre

18. Geschlecht?

Männlich      Weiblich

☐                      ☐

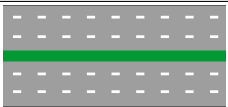
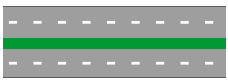

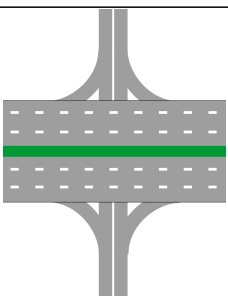
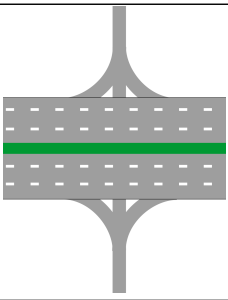
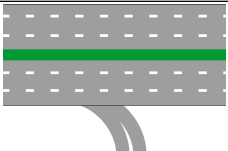
19. Ich begegne jede Woche stationären Geschwindigkeitsüberwachungsgeräten auf Autobahnabschnitten mit WVZ-Schilderbrücken!

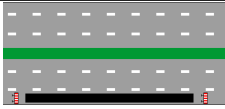
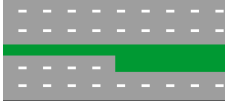
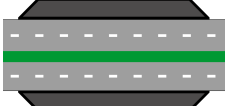
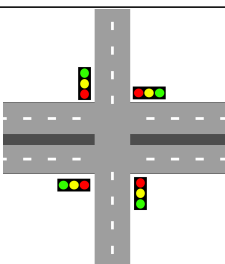
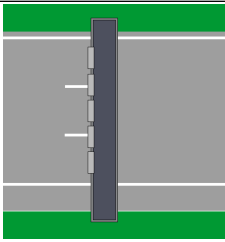
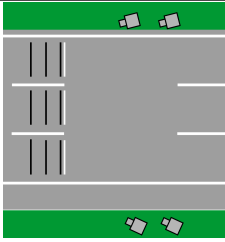
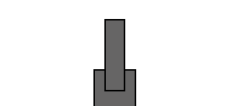
Stimme voll und ganz zu	Stimme überwiegend zu	Stimme teilweise zu	Stimme kaum zu	Stimme gar nicht zu
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>




## E. Erläuterung der Schemas

Die Abbildungen im Kapitel 5 und im Anhang A enthalten häufig eine schematische Darstellung des Streckenabschnitts bzw. der unmittelbaren Umgebung des Überwachungs-ortes. In der folgenden Tabelle finden sich kurze Erläuterungen zu den Elementen dieser schematischen Darstellungen.

Schema	Erläuterung
	Autobahn mit 3 Fahrspuren pro Fahrtrichtung und Grünstreifen in der Mitte
	Autobahn mit 2 Fahrspuren pro Fahrtrichtung und Grünstreifen in der Mitte
	Bundesstraße mit 2 Fahrspuren pro Fahrtrichtung und Betonelementen in der Mitte
	Autobahnkreuz
	Autobahnanschlussstelle
	Autobahnausfahrt

Schema	Erläuterung
	Sperrung eines Fahrstreifens
	Fahrstreifenreduktion
	Tunnel
	Kreuzung mit Lichtzeichenanlage
	Anzeigequerschnitt
	Blitz- bzw. Kamergehäuse und Sensoren in der Fahrbahn
	Einfahrts- bzw. Ausfahrtsportal

---

Schema	Erläuterung
	Fluss

**Tabelle E.1.:** Erläuterungen zu den Elementen der schematischen Darstellungen im Kapitel 5 und im Anhang A.





# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Zeitliche Entwicklung der Unfallzahlen und der Zahl Verkehrstoter . . .	2
Abb. 2.1:	Ideales Fundamentaldiagramm . . . . .	15
Abb. 2.2:	Reales Fundamentaldiagramm . . . . .	16
Abb. 2.3:	Schema einer Streckenbeeinflussungsanlage . . . . .	21
Abb. 2.4:	Schema eines punktuellen Geschwindigkeitsüberwachungsgeräts . . . .	25
Abb. 2.5:	Schema einer Abschnittskontrolle . . . . .	29
Abb. 3.1:	Schema Erfassungsbereich Trackingradar . . . . .	36
Abb. 3.2:	Schema Messsetup mit Trackingradar . . . . .	38
Abb. 3.3:	Kartenansicht der A1 bei Bremen . . . . .	39
Abb. 3.4:	Kartenansicht der A2 bei Braunschweig . . . . .	40
Abb. 3.5:	Kartenansicht der A3 bei Köln . . . . .	41
Abb. 3.6:	Kartenansicht der A71 bei Suhl . . . . .	42
Abb. 3.7:	Kartenansicht der B6 bei Hannover . . . . .	43
Abb. 4.1:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 1. . . . .	51
Abb. 4.2:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 4. . . . .	52
Abb. 4.3:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 5. . . . .	53
Abb. 4.4:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 1 von Frage 2. . . . .	54
Abb. 4.5:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 1 von Frage 3. . . . .	55
Abb. 4.6:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 2 von Frage 2. . . . .	56
Abb. 4.7:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Teil 2 von Frage 3. . . . .	57
Abb. 4.8:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 6. . . . .	58
Abb. 4.9:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 8. . . . .	59
Abb. 4.10:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 7 . . . . .	60
Abb. 4.11:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 9. . . . .	61
Abb. 4.12:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 10. . . . .	62
Abb. 5.1:	Profil der mittleren Geschwindigkeit in der Fahrtrichtung HH (A1) . .	67
Abb. 5.2:	Profil der mittleren Geschwindigkeit in der Fahrtrichtung OS (A1) . .	68
Abb. 5.3:	Detaillierter Verlauf der mittleren Geschwindigkeit in der Zufahrt für die Fahrtrichtung HH (A1) . . . . .	73
Abb. 5.4:	Detaillierter Verlauf der mittleren Beschleunigung in der Zufahrt für die Fahrtrichtung HH (A1) . . . . .	75
Abb. 5.5:	Individuelle Geschwindigkeitsänderungen in der Zufahrt für die Fahrtrich- tung HH (A1) . . . . .	77

Abb. 5.6:	Detaillierter Verlauf der mittleren Geschwindigkeit in der Zu- und Abfahrt für die Fahrtrichtung HH (A1) . . . . .	80
Abb. 5.7:	Detaillierter Verlauf der mittleren Beschleunigung in der Zu- und Abfahrt für die Fahrtrichtung HH (A1) . . . . .	82
Abb. 5.8:	Individuelle Geschwindigkeitsänderungen in der Abfahrt für die Fahrtrichtung HH (A1) . . . . .	83
Abb. 5.9:	Maximale Bremsverzögerungen in der Zufahrt für die Fahrtrichtung HH (A1) . . . . .	87
Abb. 5.10:	Maximale Bremsverzögerungen in der Abfahrt für die Fahrtrichtung HH (A1) . . . . .	88
Abb. 5.11:	Profil der mittleren Geschwindigkeit bei $v_{zul}=130$ km/h (A2) . . . . .	96
Abb. 5.12:	Profil der mittleren Geschwindigkeit bei $v_{zul}=100$ km/h (A2) . . . . .	99
Abb. 5.13:	Profil der mittleren Geschwindigkeit ohne $v_{zul}$ (A2) . . . . .	100
Abb. 5.14:	Individuelle Geschwindigkeitsänderungen bei $v_{zul}=130$ km/h in der Zufahrt (A2) . . . . .	105
Abb. 5.15:	Individuelle Geschwindigkeitsänderungen bei $v_{zul}=100$ km/h in der Zufahrt (A2) . . . . .	107
Abb. 5.16:	Maximale Bremsverzögerungen in der Zufahrt (A2) . . . . .	110
Abb. 5.17:	Häufigkeitsverteilung der Zeitlücken für die beiden Untersuchungsorte (A2) . . . . .	113
Abb. 5.18:	Profil der mittleren Geschwindigkeit (Phase 1, B6) . . . . .	121
Abb. 5.19:	Verlauf des Befolungsgrades (Phase 1, B6) . . . . .	122
Abb. 5.20:	Individuelle Geschwindigkeitsänderungen in der Zufahrt (Phase 2, B6) . . . . .	125
Abb. 5.21:	Maximale Bremsverzögerungen in der Zufahrt (Phase 2, B6) . . . . .	128
Abb. 5.22:	Profil der mittleren Geschwindigkeit (Phase 1 und 4, B6) . . . . .	135
Abb. 5.23:	Profil der mittleren Geschwindigkeit (Beginn Phase 4 und 1 Jahr später, B6) . . . . .	136
Abb. 5.24:	Verlauf des Befolungsgrades (Phase 1 und 4, B6) . . . . .	137
Abb. A.1:	Profil der mittleren Geschwindigkeit (A3) . . . . .	159
Abb. A.2:	Profil der mittleren Geschwindigkeit (A71) . . . . .	166
Abb. B.1:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 11. . . . .	174
Abb. B.2:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 12. . . . .	175
Abb. B.3:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 13. . . . .	176
Abb. B.4:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 14 . . . . .	177
Abb. B.5:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für Frage 15 . . . . .	178
Abb. B.6:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Kennern und Nicht-Kennern in Frage 2 Teil 1. . . . .	179
Abb. B.7:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Kennern und Nicht-Kennern in Frage 3 Teil 1. . . . .	180
Abb. B.8:	Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Männern und Frauen in Frage 2 Teil 1. . . . .	182

Abb. B.9: Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung von Männern und Frauen in Frage 3 Teil 1. . . . .	183
Abb. B.10: Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung der drei Altersklassen in Frage 2 Teil 1. . . . .	184
Abb. B.11: Histogramm der Antworthäufigkeiten für die Gegenüberstellung der drei Altersklassen in Frage 3 Teil 1. . . . .	185
Abb. D.1: Typische WVZ-Schilderbrücke . . . . .	191
Abb. D.2: Geschwindigkeitsüberwachungsgerät und Hinweisschild . . . . .	192



# Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1:	Übersicht über die Klassen der Fahrmanöver der Fahrzeugführer in der Zufahrt. . . . .	78
Tab. 5.2:	Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt (A1) . . . . .	78
Tab. 5.3:	Übersicht über die Klassen der Fahrmanöver der Fahrzeugführer in der Abfahrt. . . . .	84
Tab. 5.4:	Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Abfahrt (A1) . . . . .	84
Tab. 5.5:	Mittlere Geschwindigkeitsänderungen für Zufahrt und Abfahrt (A1) . .	85
Tab. 5.6:	Häufigkeiten des Auftretens kritischer Zeitlücken in der Zufahrt (A1) .	89
Tab. 5.7:	Mittlere Geschwindigkeitsänderungen durch Überwachung (A2) . . . .	98
Tab. 5.8:	Mittlere Geschwindigkeitsänderungen für Zufahrt und Abfahrt (A2) . .	103
Tab. 5.9:	Häufigkeiten des Auftretens kritischer Zeitlücken in der Zufahrt (A2) .	111
Tab. 5.10:	Gegenüberstellung mittlere Geschwindigkeiten und Befolgungsgrade in Phase 2 (B6) . . . . .	124
Tab. 5.11:	Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt in Phase 2 (B6) . . . . .	126
Tab. 5.12:	Gegenüberstellung mittlere Geschwindigkeiten und Befolgungsgrade in Phase 3 (B6) . . . . .	130
Tab. 5.13:	Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt in Phase 3 (B6) . . . . .	131
Tab. 5.14:	Verteilung der Fahrzeugführer in die 6 Fahrmanöverklassen für die Zufahrt und Abfahrt in Phase 4 (B6) . . . . .	138
Tab. A.1:	Mittlere Geschwindigkeitsänderungen für Zufahrt und Abfahrt (A3) . .	161
Tab. A.2:	Mittlere Geschwindigkeitsänderungen für Zufahrt und Abfahrt (A71) .	169
Tab. E.1:	Erläuterungen zu den schematischen Darstellungen . . . . .	199



# Literaturverzeichnis

- [AA08] M. Abdel-Aty, R. J. Cunningham, V. V. Gayah und L. Hsia, *Dynamic Variable Speed Limit Strategies for Real-Time Crash Risk Reduction on Freeways*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2078**, S. 108 – 116 (2008).
- [Aar06] L. Aarts und I. van Schagen, *Driving speed and the risk of road crashes: a review*, Accident Analysis & Prevention **38** (2), S. 215 – 224 (2006).
- [Abe97] L. Aberg, L. Larsen, A. Glad und L. Beilinson, *Observed vehicle speed and drivers perceived speed of others*, Applied Psychology: An International Review **46** (3), S. 287 – 302 (1997).
- [Ack15] W. Ackaah, G. Huber und K. Bogenberger, *Quality Evaluation Method for Variable Speed Limit Systems*, in *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 19 (2015).
- [Ack16a] W. Ackaah und K. Bogenberger, *Advanced Evaluation Methods for Variable Speed Limit Systems*, Transportation Research Procedia – International Symposium on Enhancing Highway Performance (ISEHP) **15**, S. 652 – 663 (2016).
- [Ack16b] W. Ackaah, G. Huber, K. Bogenberger und R. L. Bertini, *Assessing the Harmonization Potential of Variable Speed Limit Systems*, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 18 (2016).
- [Ada81] F. Adam, *Optische Geschwindigkeitsmess- und Warnanlage*, Straßenverkehrstechnik **5**, S. 163 – 164 (1981).
- [Ahi15] L. M. Ahie, S. G. Charlton und N. J. Starkey, *The role of preference in speed choice*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **30**, S. 66 – 73 (2015).
- [Alb76] H. Albrecht und H.-W. Schneider, *Verkehrsbeeinflussung durch Wechselverkehrszeichen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **206** (1976).
- [Ali97] S. Y. Ali, O. Al-Saleh und P. A. Koushki, *Effectiveness of Automated Speed-Monitoring Cameras in Kuwait*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1595**, S. 20 – 26 (1997).

- [Alj99] A. A. M. Aljanahi, A. H. Rhodes und A. V. Metcalfe, *Speed, speed limits and road traffic accidents under free flow conditions*, Accident Analysis & Prevention **31**, S. 161 – 168 (1999).
- [Ama14] S. Amado, E. Arikan, G. Kaça, M. Koyuncu und B. N. Turkan, *How accurately do drivers evaluate their own driving behavior? An on-road observational study*, Accident Analysis & Prevention **63**, S. 65 – 73 (2014).
- [Ana16] P. C. Anastasopoulos und F. L. Mannering, *The effect of speed limits on drivers' choice of speed: A random parameters seemingly unrelated equations approach*, Analytic Methods in Accident Research **10**, S. 1 – 11 (2016).
- [Ant12] D. Antov, A. Banet, C. Barbier, T. Bellet, Y. Bimpeh, A. Boulanger, C. Brandstätter, V. Britschgi, M. Brosnan, I. Buttler, J. Cestac, S. De Craen, P. Delhomme, E. Dogan, E. Drapela, S. Forward, R. Freeman, G. Furian, M. Gabor, C. Goldenbeld, P. Henriksson, H. Holte, S. Kraiem, E. Papadimitriou, A. Podlasek, M. Polic, F. Sanchez-Martin, G.-M. Sardi, E.-A. Schmidt, P. Silverans, T. Siska, P. Skladana, A. Theofilatos, A. von Below, G. Yannis, D. Zaidel und N. Zavrvides, *European road users' risk perception and mobility – The SARTRE 4 survey*, Technischer Bericht, SARTRE 4 Consortium (2012).
- [Art11] R. M. Arthur, *Examining Traffic Flow and Speed Data: Determining Imitative Behavior*, Traffic Injury Prevention **12** (3), S. 266 – 273 (2011).
- [Bal95] W. Balz, *Wirkungen kollektiver Verkehrsbeeinflussungsanlagen*, Straßenverkehrstechnik **7**, S. 301 – 307 (1995).
- [Bal98] W. Balz und P. Ermer, *Feldversuche zur Bestimmung der Wirkungen verschiedener Kombinationen von WVZ-Anzeigen*, Straßenverkehrstechnik **12**, S. 644 – 649 (1998).
- [Bar84] J. W. Barnes, *Effectiveness of Radar Enforcement*, Technischer Bericht, Road Traffic Safety Research Council, Wellington, New Zealand (1984).
- [BAS16] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Verkehrs- und Unfalldaten – Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland* (2016).
- [Ben08] R. F. Benekahal, M. V. Chitturi, A. Hajbabaie, M.-H. Wang und J. C. Medina, *Automated Speed Photo Enforcement Effects on Speeds in Work Zones*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2055**, S. 11 – 20 (2008).
- [Ben10] R. F. Benekahal, A. Hajbabaie, J. C. Medina, M.-H. Wang und M. V. Chitturi, *Speed Photo-Radar Enforcement Evaluation in Illinois Work Zones*, Technischer Bericht, Illinois Center for Transportation (2010).



- [BG16] H. Bar-Gera, E. Schechtman und O. Musicant, *Evaluating the Effect of Enforcement on Speed Distributions Using Probe Vehicle Data*, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 14 (2016).
- [Bit65] F. Bitzl, *Erfahrungen mit zeitweisen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf überlasteten Bundesautobahnen*, *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* **36** (1965).
- [Bli06] K. M. Blincoe, A. P. Jones, V. Sauerzapf und R. Haynes, *Speeding drivers' attitudes and perceptions of speed cameras in rural England*, *Accident Analysis & Prevention* **38** (2), S. 371 – 378 (2006).
- [Bli14] W. Blindenbacher, *Die Abschnittskontrolle (Section-Control)*, *Polizei Verkehr + Technik* **6**, S. 21 – 23 (2014).
- [Blo98] S. A. Bloch, *Comparative Study of Speed Reduction Effects of Photo-Radar and Speed Display Boards*, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **1640**, S. 27 – 36 (1998).
- [BMV97a] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Abteilung Straßenbau, *Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen* (1997).
- [BMV97b] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Abteilung Straßenbau, *Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen* (1997).
- [BMV11] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, *Verkehrssicherheitsprogramm 2011* (2011).
- [Bod83] K.-R. Bode und W. Haller, *Geschwindigkeitssteuerung auf der A7 zwischen den Autobahndreiecken Hannover-Nord und Walsrode*, *Straßenverkehrstechnik* **5**, S. 145 – 151 (1983).
- [Bri05] W. Brilon, M. Regler und J. Geistefeldt, *Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen*, *Straßenverkehrstechnik* **3 + 4** (2005).
- [Büs75] G. Büschges, R. Ernst, G. Hoffmann, H. Keller, K.-H. Lenz, G. Schmidt und W. Schneider, *Auswirkungen von Tempo 100 auf Verkehrsablauf und Unfallgeschehen*, *Technischer Bericht*, Projektgruppe Tempo 100, Bundesanstalt für Straßenwesen (1975).
- [Bäu10] M. Bäumer, H. Hautzinger, T. Kathmann, S. Schmitz, C. Sommer und M. Wer-muth, *Ermittlung von Standards für anforderungsgerechte Datenqualität bei Verkehrserhebungen*, *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik* **V 200** (2010).

- [Bud94] C. Buddingh, *Nieuw controlemiddel snelheidsduivels*, Leidsch Dagblad **15. September 1994**, S. 21 (1994).
- [Bur66] F. Burkhardt, *Beurteilung der Kraftfahrzeugabstände auf Bundesautobahnen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **46** (1966).
- [Bus09] F. Busch, S. Grosanic, A. Dinkel, A. Schieferstein und M. Stadler, *Begleitforschung und Ergänzung des Merkblatts Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen*, Technischer Bericht, Bundesanstalt für Straßenwesen (2009).
- [Cam92] M. Cameron, A. Cavallo und A. Gilbert, *Crash-Based Evaluation of Speed Camera Program in Victoria 1990 – 1991, Phase 1: Genral effects, Phase 2: Effects of program mechanisms*, Technischer Bericht Report No. 42, Accident Research Centre, Monash University (1992).
- [Car13] L. Carnis und E. Blais, *An assessment of the safety effects of the French speed camera program*, Accident Analysis & Prevention **51**, S. 301 – 309 (2013).
- [Cas93] S. M. Casey und A. K. Lund, *The effects of mobile roadside speedometers on traffic speeds*, Accident Analysis & Prevention **25** (5), S. 627 – 634 (1993).
- [Cas11] E. Cascetta, V. Punzo und M. Montanino, *Empirical Analysis of Effects of Automated Section Speed Enforcement System on Traffic Flow at Freeway Bottlenecks*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2260**, S. 83 – 93 (2011).
- [Cau04] J.-P. Cauzard, *European drivers and road risk – Part 1 Report on principle analysis*, Technischer Bericht, SARTRE 3 Consortium (2004).
- [Cha05] P. Champness, M. Sheehan und L.-M. Folkman, *Time and distance halo effects of an overtly deployed mobile speed camera*, in *Proceedings of the Road Safety Research, Policing and Education Conference, Wellington, New Zealand*, S. 10 (2005).
- [Cha08] K. Charlesworth, *The effect of average speed enforcement on driver behaviour*, in *Road Transport Information and Control – RTIC 2008 and ITS United Kingdom Members’ Conference*, S. 188 – 192 (2008).
- [Che00] G. Chen, J. Wilson, W. Meckle und P. Cooper, *Evaluation of photo radar program in British Columbia*, Accident Analysis & Prevention **32**, S. 517 – 526 (2000).
- [Che02] G. Chen, W. Meckle und J. Wilson, *Speed and safety effect of photo radar enforcement on a highway corridor in British Columbia*, Accident Analysis & Prevention **34**, S. 129 – 138 (2002).

- 
- [Chr03] S. M. Christie, R. A. Lyons, F. D. Dunstan und S. J. Jones, *Are mobile speed cameras effective? A controlled before and after study*, Injury Prevention **9**, S. 302 – 306 (2003).
- [Col08] G. Collins und D. McConnell, *Speed harmonisation with average speed enforcement*, Traffic Engineering and Control **49**, S. 6 – 9 (2008).
- [Cor99] C. Corbett und F. Simon, *The effects of speed cameras: How drivers respond*, Technischer Bericht, Department of Law, Brunel University (1999).
- [Cor00] C. Corbett, *A typology of drivers' responses to speed cameras: Implications for speed limit enforcement and road safety*, Psychology, Crime & Law **6** (4), S. 305 – 330 (2000).
- [Cun08] C. M. Cunningham, J. E. Hummer und J.-P. Moon, *Analysis of Automated Speed Enforcement Cameras in Charlotte, North Carolina*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2078**, S. 127 – 134 (2008).
- [Dar76] O. K. Dart und W. W. Hunter, *Evaluation of the Halo Effect in Speed Detection and Enforcement*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **609**, S. 31 – 33 (1976).
- [Dia02] K. Diamantopoulou und M. Cameron, *An Evaluation of the Effectiveness of overt and covert Speed Enforcement achieved through mobile radar Operations*, Technischer Bericht Report No. 187, Accident Research Centre, Monash University (2002).
- [DOT96] Department of Transport, *West London Speed Camera Demonstration Project* (1996).
- [Ebe60] R. E. von Eberhorst und H. Gebelein, *Statistische Studie über die Unfälle auf einer Autobahnstrecke vor und nach der Einführung der Geschwindigkeitsbegrenzung*, Zeitschrift für Verkehrssicherheit **6** (1), S. 38 – 54 (1960).
- [EiO88] Bundesgesetzblatt, *Eichordnung, Anlage 18 Abschnitt 11, Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte* (12. August 1988).
- [Elv97] R. Elvik, *Effects on Accidents of Automatic Speed Enforcement in Norway*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1595** (970118), S. 14 – 19 (1997).
- [Elv04] R. Elvik, P. Christensen und A. Amundsen, *Speed and road accidents: An evaluation of the Power Model*, Technischer Bericht TOI report 740/2004, Institute of Transport Economics, Norway (2004).
- [Elv05] R. Elvik, *Speed and Road Safety: Synthesis of Evidence from Evaluation Studies*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1908**, S. 59 – 69 (2005).

- [Elv09] R. Elvik, A. Høye, T. Vaa und M. Sørensen, *The Handbook of road safety measures*, Bd. Second Edition, Emerald Group Publishing Limited (2009).
- [Erk09] A. Erke, C. Goldenbeld und T. Vaa, *Deliverable 9 – Good practice in the selected key areas: Speeding, drink driving and seat belt wearing: Results from meta-analysis*, Technischer Bericht, Police Enforcement Policy and Programmes on European Roads (2009).
- [EUK10] Europäische Kommission, *Leitlinien für die Politik im Bereich der Straßenverkehrssicherheit 2011 – 2020* (2010).
- [Fen01] C. Feng, *Synthesis of Studies on Speed and Safety*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1779**, S. 86 – 92 (2001).
- [Fie88] R. Fieldwick und E. J. H. de Beer, *Rural speed limit changes and safety*, Transportation Planning and Technology **12** (3 – 4), S. 173 – 180 (1988).
- [Fil94] B. N. Fildes, G. Rumbold und A. Leening, *Speed behaviour and Driver's Attitude to Speeding*, Technischer Bericht Report No. 16, Accident Research Centre, Monash University (1994).
- [Fle10] J. J. Fleiter, A. Lennon und B. Watson, *How do other people influence your driving speed? Exploring the 'who' and the 'how' of social influences on speeding from a qualitative perspective*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **13** (1), S. 49 – 62 (2010).
- [FSV10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, *Hinweise zur kurzzeitigen automatischen Erfassung von Daten des Straßenverkehrs* (2010).
- [FSV12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, *Empfehlungen für Verkehrserhebungen* (2012).
- [Gai05] A. Gains, M. Nordstrom, B. Heydecker, J. Shrewsbury, L. Mountain und M. Maher, *The National Safety Camera Program: Four-Year Evaluation Report*, Technischer Bericht, PA Consulting Group, London (2005).
- [Gar90] S. Garber und J. D. Graham, *The effects of the new 65 mile-per-hour speed limit on rural highway fatalities: A state-by-state analysis*, Accident Analysis & Prevention **22** (2), S. 137 – 149 (1990).
- [Gar16] S. A. Gargoum, K. El-Basyouny und A. Kim, *Towards setting credible speed limits: Identifying factors that affect driver compliance on urban roads*, Accident Analysis & Prevention **95**, S. 138 – 148 (2016).
- [Gei11a] J. Geistefeldt, *Capacity effects of variable speed limits on German freeways – 6 th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service*, Procedia Social and Behavioral Sciences **16**, S. 48 – 56 (2011).

- [Gei11b] J. Geistefeldt, *Empirical Relation Between Stochastic Capacities and Capacities Obtained from the Speed-Flow Diagram*, in *75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory – Greenshields Symposium*, S. 147 – 156 (2011).
- [Get03a] D. Gettman und L. Head, *Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1840** (1), S. 104 – 115 (2003).
- [Get03b] D. Gettman und L. Head, *Surrogate Safety Measures from Traffic Simulation Models: Final Report*, Technischer Bericht FHWA-RD-03-050, Office of Safety Research and Development, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation (2003).
- [Get08] D. Gettman, L. Pu, T. Sayed und S. G. Shelby, *Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report*, Technischer Bericht FHWA-HRT-08-051, FHWA, U.S. Department of Transportation (2008).
- [Gla98] W. D. Glauz, *Review of Automated Technologies for Speed Management and Enforcement*, in *Managing Speed - Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits*, Bd. Special Report 254, S. 359 – 390 (1998).
- [Gol05] C. Goldenbeld und I. van Schlagen, *Behaviour and Safety Effects of speed enforcement with mobile radar: A field experiment on rural roads in the Dutch province Friesland*, in *17th ICTCT Workshop*, S. 261 – 271 (2005).
- [Gol07] C. Goldenbeld und I. van Schlagen, *The credibility of speed limits on 80 km/h rural roads: The effects of road and person(ality) characteristics*, Accident Analysis & Prevention **39** (6), S. 1121 – 1130 (2007).
- [Gra17] D. J. Graham, C. Naik, E. J. McCoy und H. Li, *Quantifying the Causal Effect of Speed Cameras on Road Traffic Collisions via an Approximate Bayesian Doubly Robust Estimator*, in *96th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 15 (2017).
- [Gre35] B. D. Greenshields, *A Study of Traffic Capacity*, in *14. Annual Meeting Highway Research Board*, S. 448 – 477 (1935).
- [Gri95] M. S. Griffith, *Discussion of "Did the 65-mph Speed Limit Save Lives?" with response by C. Lave*, Accident Analysis & Prevention **27** (1), S. 137 – 140 (1995).
- [Hab13] F. G. Habtemichael und L. de Picado Santos, *Safety and Operational Benefits of Variable Speed Limits Under Different Traffic Conditions and Driver Compliance Levels*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2386** (1), S. 7 – 15 (2013).

- [Hag99] M. P. Hagenzieker, *Rewards and road user behaviour: An investigation of the effects of reward programs on safety belt use*, Dissertation, University Leiden (1999).
- [Hag00] M. Haglund und L. Åberg, *Speed choice in relation to speed limit and influences from other drivers*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **3** (1), S. 39 – 51 (2000).
- [Haj11] A. Hajbabaie, J. C. Medina, M.-H. Wang, R. F. Benekahal und M. Chitturi, *Sustained and Halo Effects of Various Speed Reduction Treatments in Highway Work Zones*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2265**, S. 118 – 128 (2011).
- [Han74] J. E. Haney und K. Weber, *The Relationships between Speed, Speed Limits, and Motor Vehicle Accidents*, Technischer Bericht UM-HSRI-RI-74-1, Highway Safety Research Institute, University of Michigan (1974).
- [Has17] H. M. Hassan, M. Shawky, M. Kishta, A. M. Garib und H. A. Al-Harthei, *Investigation of drivers' behavior towards speeds using crash data and self-reported questionnaire*, Accident Analysis & Prevention **98**, S. 348 – 358 (2017).
- [Hau71] E. Hauer, *Accidents, Overtaking and Speed Control*, Accident Analysis & Prevention **3** (1), S. 1 – 13 (1971).
- [Hau82] E. Hauer, F. J. Ahlin und J. S. Bowser, *Speed enforcement and speed choice*, Accident Analysis & Prevention **14** (4), S. 267 – 278 (1982).
- [Hau09] E. Hauer, *Speed and Safety*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2103**, S. 10 – 17 (2009).
- [Hel98] D. Helbing und M. Treiber, *Gas-Kinetic-Based Traffic Model Explaining Observed Hysteretic Phase Transition*, Physical Review Letters **81** (14), S. 3042 – 3045 (1998).
- [Hel99] D. Helbing, A. Hennecke und M. Treiber, *Phase Diagram of Traffic States in the Presence of Inhomogeneities*, Physical Review Letters **82** (21), S. 4360 – 4363 (1999).
- [Hel01a] D. Helbing, *Die wundervolle Welt aktiver Vielteilchensysteme: Autos, Fußgänger, Vögel oder andere motorisierte Teilchen lassen sich durch relativ einfache Verallgemeinerungen der Newtonschen Gleichungen beschreiben*, Physikalische Blätter **57** (1), S. 27 – 33 (2001).
- [Hel01b] D. Helbing, *Traffic and related self-driven many-particle systems*, Reviews of Modern Physics **73**, S. 1067 – 1141 (2001).

- [Hel03] D. Helbing und K. Nagel, *Verkehrsdynamik und urbane Systeme*, Physik Journal **2** (5), S. 35 – 41 (2003).
- [Hes03] S. Hess und J. Polak, *An Analysis of the Effects of Speed Limit Enforcement Cameras on Accident Rates*, in *82th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 17 (2003).
- [Hes04] S. Hess, *An analysis of the effects of speed limit enforcement cameras with differentiation by road type and catchment area*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1865**, S. 28 – 34 (2004).
- [Hir05] W. M. Hirst, L. J. Mountain und M. J. Maher, *Are speed enforcement cameras more effective than other speed management measures? An evaluation of the relationship between speed and accident reductions*, Accident Analysis & Prevention **37**, S. 731 – 741 (2005).
- [Hol96] C. A. Holland und M. T. Conner, *Exceeding the speed limit: An evaluation of the effectiveness of a police intervention*, Accident Analysis & Prevention **28** (5), S. 587 – 597 (1996).
- [Hoo94] E. van den Hoogen und S. Smulders, *Control by variable speed signs: results of the Dutch experiment*, in *Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, S. 145 – 149 (1994).
- [Hoo13] S. P. Hoogendoorn, W. Daamen, R. G. Hoogendoorn und J. W. Goemans, *Assessment of Dynamic Speed Limits on freeway A20 near Rotterdam, the Netherlands*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2380**, S. 61 – 71 (2013).
- [Hos63] H. Hosse, *Die Unfälle auf der Bundesautobahn Köln-Bonn vor und nach Einführung der Geschwindigkeitsbeschränkungen*, Polizei Technik Verkehr **8** (7), S. 291 – 293 (1963).
- [Hou85] R. van Houten, A. Rolider, P. A. Nau, R. Friedman, M. Becker, I. Chalodovsky und M. Scherer, *Large-scale reductions in speeding and accidents in Canada and Israel: A behavioral ecological perspective*, Journal of Applied Behavior Analysis **18** (1), S. 87 – 93 (1985).
- [Høy14a] A. Høy, *Evaluation of the crash effects of section control*, Technischer Bericht TOI Report 1339, Institute of Transport Economics, Norwegian Centre for Transport Research (2014).
- [Høy14b] A. Høy, *Speed cameras, section control, and kangaroo jumps – a meta-analysis*, Accident Analysis & Prevention **73**, S. 200 – 208 (2014).
- [Høy15] A. Høy, *Safety effects of section control – An empirical Bayes evaluation*, Accident Analysis & Prevention **74**, S. 169 – 178 (2015).

- [Iza15] P. Izadpanah, S. Thukral, H. Zarei und A. Hadayeghi, *Safety Evaluation of Red Light Camera and Intersection Speed Camera Programs in Alberta*, in *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 13 (2015).
- [Jen15] Jenoptik, *New methods for improving traffic safety in Germany*, Traffic Technology International **October/November**, S. 64 – 65 (2015).
- [Jäg08] F. Jäger, *50 Jahre Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte mit PTB-Zulassungen*, in *244. PTB-Seminar – 50 Jahre Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte mit Zulassung der PTB* (2008).
- [Kal08] V.-P. Kallberg, D. Zaidel, T. Vaa, J. Malenstein, A. Siren und E. Gaitanidou, *Deliverable 17 – Final Report*, Technischer Bericht, Police Enforcement Policy and Programmes on European Roads (2008).
- [Kap10] G. Kappich, C. Westermann, R. Schmitz, S. Reitenberger, T. Volkenhoff, D. Kemper, M. Brake und B. Steinhauer, *Echtzeitbeurteilung und -optimierung der Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **1040** (2010).
- [Kat98] T. Kathmann, *Geschwindigkeitswarnanlagen – eine Alternative zur polizeilichen Überwachung?*, Straßenverkehrstechnik **9**, S. 483 – 491 (1998).
- [Kay82] H. J. Kayser und W. Baltzer, *Befolgung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen in Tunneln in Abhängigkeit von der Ausstattung*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **372** (1982).
- [Kea01] M. D. Keall, L. J. Povey und W. J. Frith, *The relative effectiveness of a hidden versus a visible speed camera programme*, Accident Analysis & Prevention **33** (2), S. 277 – 284 (2001).
- [Kee03] D. Keenan und F. Maunsell, *Speed Cameras – Measuring the impact on driver behaviour*, in *Proceedings of the European Transport Conference (ETC)*, Association for European Transport, Strasbourg, France (2003).
- [Ken16] A. Kendziorra, P. Wagner und T. Toledo, *A Stochastic Car Following Model*, Transportation Research Procedia – International Symposium on Enhancing Highway Performance (ISEHP) **15**, S. 198 – 207 (2016).
- [Ker96] B. S. Kerner und H. Rehborn, *Experimental properties of complexity in traffic flow*, Physical Review E **53** (5), S. R4275 – R4278 (1996).
- [Ker97] B. S. Kerner und H. Rehborn, *Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow*, Physical Review Letters **79** (20), S. 4030 – 4033 (1997).
- [Ker17] M. Kergoat, P. Delhomme und T. Meyer, *Appraisal of speed-enforcement warning messages among young drivers: Influence of automatic versus human speed enforcement in a known or unknown location*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **46, Part A**, S. 177 – 194 (2017).



- [Köh76] U. Köhler, *Geschwindigkeitsverhalten auf Autobahnen*, Straßenverkehrstechnik **3**, S. 79 – 83 (1976).
- [Küh97] R. D. Kühne, *Auswirkungen der Verkehrsleittechnik auf die Rentabilität von Projekten der Bundesverkehrswegeplanung*, Technischer Bericht, Kolloquium Universität Stuttgart (1997).
- [Küh05] R. D. Kühne, R. Aoki, G. Kellermann, D. Manstetten, S. Schnittger und N. Wu, *Hinweise zum Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen*, Technischer Bericht FGSV-Nr. 385, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2005).
- [Kho15] B. Khondaker und L. Kattan, *Variable speed limit: an overview*, Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research **7** (5), S. 264 – 278 (2015).
- [Kno02] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg, *Single-vehicle data of highway traffic: Microscopic description of traffic phases*, Physical Review E **65**, S. 056133-1 – 056133-16 (2002).
- [Koß96] I. Koßmann, *Polizeiliche Verkehrsüberwachung*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit **M 67** (1996).
- [Koo91] M. J. Koornstra, *Strategies in Behaviour Modification – Theoretical Background – An introductory literature study for the OECD-Expert Group on Enforcement and Rewarding: strategies and effects*, in *International road safety symposium*, SWOV Institute for Road Safety Research, S. 23 (1991).
- [Koo02] M. Koornstra, D. Lynam, G. Nilsson, P. Noordzij, H.-E. Pettersson, F. Wegman und P. Wouters, *SUNflower: A comparative study of the development of road safety in Sweden, the United Kingdom, and the Netherlands*, Technischer Bericht, SWOV Institute for Road Safety Research, The Netherlands, TRL Transport Research Laboratory, United Kingdom, VTI National Road and Transport Research Institute, Sweden (2002).
- [Kor60] W. Korte, A. Mäcke, R. Lapierre und G. Kotitschke, *Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsbegrenzung aus der verkehrstechnischen Sicht*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **7** (1960).
- [Kor14] E. W. Korthof, *Effects of section control on traffic safety at Dutch motorways*, Diplomarbeit, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Section Transport & Planning (2014).
- [Koy11] T. Koy, S. Benz und L. Haas, *Auswirkungen von Abschnittsgeschwindigkeitskontrollen (AGK) auf das Fahrverhalten und Unfallgeschehen*, Technischer Bericht Nr. 60.404.0-001, Bundesamt für Straßen ASTRA, Rapp Trans AG (2011).

- [Kre83] H. G. Krebs und N. Damianoff, *Geschwindigkeitsverhalten bei Gefahrenzeichen, in Kurven und an Stellen mit Geschwindigkeitsbeschränkung*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **380** (1983).
- [Kru98] W. Krux und H. Potthoff, *Stationäre Geschwindigkeitsüberwachung am Elzer Berg*, Straßenverkehrstechnik **4**, S. 189 – 193 (1998).
- [Kup15] J. Kupper, *Verkehrsflussmessungen – Vergleich zwischen Laserscanner und Trackingradar*, Technisches Messen **82** (2), S. 65 – 72 (2015).
- [Kur11] T. Kurth und J. Rohde, *Empirische Untersuchung zur Wirkung von dynamischen Geschwindigkeitsanzeigen in Hannover*, Technischer Bericht, Kurzfassung einer Bachelorarbeit, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig (2011).
- [Lah16] H. Lahrmann, B. Brassøe, J. W. Johansen und J. C. O. Madsen, *Safety Impact of Average Speed Control in the UK*, Journal of Transportation Technologies **6**, S. 312 – 326 (2016).
- [Lam84] R. Lamm und J. H. Kloeckner, *Increase of Traffic Safety by Surveillance of Speed Limits with Automatic Radar Devices on a Dangerous Section of a German Autobahn: A Long-Term Investigation*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **974**, S. 8 – 16 (1984).
- [Lav94] C. Lave und P. Elias, *Did the 65 mph Speed limit save Lives?*, Accident Analysis & Prevention **26** (1), S. 49 – 62 (1994).
- [Law07] S. Lawpoolsri, J. Li und E. R. Braver, *Do Speeding Tickets Reduce the Likelihood of Receiving Subsequent Speeding Tickets? A Longitudinal Study of Speeding Violators in Maryland*, Traffic Injury Prevention **8** (1), S. 26 – 34 (2007).
- [Lee04] C. Lee, B. Hellinga und F. Saccomanno, *Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1897** (1), S. 183 – 190 (2004).
- [Lee06] C. Lee, B. Hellinga und F. Saccomanno, *Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies **14** (3), S. 213 – 228 (2006).
- [Lee17] Y. M. Lee, S. Y. Chong, K. Goonting und E. Sheppard, *The effect of speed limit credibility on drivers' speed choice*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **45**, S. 43 – 53 (2017).
- [Leh13] M. Lehning, *Analyzing Traffic at Intersections*, Traffic Technology International **June/July**, S. 70 – 71 (2013).

- [Leo14] D. de Leonardis, E. Robinson, R. Huey und R. G. Atkins, *Threshold Effects of Speed-Monitoring Devices on the Speeding Behavior of Drivers*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2425** (1), S. 17 – 24 (2014).
- [Let05] F. Letirand und P. Delhomme, *Speed behaviour as a choice between observing and exceeding the speed limit*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **8** (6), S. 481 – 492 (2005).
- [Leu66] W. Leutzbach und S. Bexelius, *Probleme der Kolonnenfahrt*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **44** (1966).
- [Li13] H. Li, D. J. Graham und A. Majumdar, *The impacts of speed cameras on road accidents: An application of propensity score matching methods*, Accident Analysis & Prevention **60**, S. 148 – 157 (2013).
- [Li15] R. Li, K. El-Basyouny und A. Kim, *A Before-and-After Empirical Bayes Evaluation of Automated Mobile Speed Enforcement on Urban Arterial Roads*, in *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 18 (2015).
- [Li16] H. Li und D. J. Graham, *Heterogeneous treatment effects of speed cameras on road safety*, Accident Analysis & Prevention **97**, S. 153 – 161 (2016).
- [Lig55a] M. J. Lighthill und G. B. Whitham, *On Kinematic Waves I. – Flood Movement in Long Rivers*, in *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 229 (1178), S. 281 – 316 (1955).
- [Lig55b] M. J. Lighthill und G. B. Whitham, *On Kinematic Waves II. – Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads*, in *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 229 (1178), S. 317 – 345 (1955).
- [Lig64] M. J. Lighthill und G. B. Whitham, *On Kinematic Waves II. – Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads*, in *An Introduction to Traffic Flow Theory*, Gerlough, D. L. and Capelle, D. G., Nr. 79 in Highway Research Board, Kap. 1, S. 7 – 35 (1964).
- [Lip12] C. Lippold, G. Weise und T. Jährg, *Verbesserung der Verkehrssicherheit auf einbahnig zweistreifigen Außerortsstraßen (AOSI)*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik **V 216** (2012).
- [Liu97] G. X. Liu und A. Popoff, *Provincial-Wide Travel Speed and Traffic Safety Study in Saskatchewan*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1595**, S. 8 – 13 (1997).
- [Liu11] P. Liu, X. Zhang, W. Wang und C. Xu, *Driver Response to Automated Speed Enforcement on Rural Highways in China*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2265**, S. 109 – 117 (2011).

- [Lod13] M. Lodes und R. F. Benekohal, *Individual Drivers' Speed Increase in Response to Speed Photo Enforcement and Police Patrol Car*, in *92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 12 (2013).
- [Lu14] X.-Y. Lu und S. E. Shladover, *Review of Variable Speed Limits and Advisories – Theory, Algorithms and Practice*, in *93rd TRB Annual Meeting*, S. 18 (2014).
- [Lut97] R. Luthmann, U. Potthoff, S. Wachs, B. Reich und T. Dietrich, *Kommunale Überwachung von Kfz-Geschwindigkeiten in Tempo-30-Zonen*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit **M 79** (1997).
- [Mac95] E. Machemer, B. Runde, U. Wolf, D. Büttner, M. Tücke, H. Kley, M. Pieper, R. Schophuis, H. Timmer, H. Trecksel und A. Wundram, *Delegierte Belohnung und intensivierete Verkehrsüberwachung im Vergleich – Eine empirische Untersuchung zur Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit **M 48** (1995).
- [Mae14] S. Maerivoet und L. Akkermans, *A Concise Impact Assessment of Average Speed Control*, Technischer Bericht, Transport & Mobility Leuven (2014).
- [Mail16] F. Maier und J. Grötsch, *Wie wirkt Verkehrsbeeinflussung? – Vom Nachweis scheinbar kleiner Effekte mit Messdaten*, Straßenverkehrstechnik **7**, S. 418 – 424 (2016).
- [Mal97] J. Malenstein, *Automated Video Speed Enforcement and Trajectory Control, Combined with fully automated Processing*, Technischer Bericht, Traffic and Transport Division, Dutch National Police Agency (1997).
- [Man96] M. Mangold, K. Träger und A. Lindenbach, *Wirksamkeit von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Umfelddatenerfassung*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **729** (1996).
- [Mar86] E.-A. Marburger, L. Meyer und R. Ernst, *Untersuchung zur Auswirkung der vorübergehenden Anordnung von Tempo 100 auf Bundesautobahnstrecken im Rahmen des Abgas-Großversuchs auf das Unfallgeschehen*, Bereich Unfallforschung, Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (1986).
- [Mar96] A. M. Markovic, C.-H. Lührs, M. Michel, J. Kapkovic, B. Miric und F. Jäger, *Geschwindigkeitsmessungen im Straßenverkehr*, expert verlag (1996).
- [Mar15] H. Marciano, P. Setter und J. Norman, *Overt vs. covert speed cameras in combination with delayed vs. immediate feedback to the offender*, Accident Analysis & Prevention **79**, S. 231 – 240 (2015).
- [MAZ99] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ 99)* (1999).

- [McK90] A. J. McKnight und T. M. Klein, *Relationship of 65-mph Limit to Speeds and Fatal Accidents*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1281**, S. 71 – 77 (1990).
- [McM09] T. McMurtry, M. Riffkin, S. Heath und M. Saito, *Variable Speed Limit Signs: Effects on Speed and Speed Variation in Work Zones*, in *Transportation Research Circular – Presentations from the 12th AASHTO-TRB Maintenance Management Conference*, Bd. E-C135, S. 159 – 174 (2009).
- [Med09] J. C. Medina, R. F. Benekohal, A. Hajbabaie, M.-H. Wang und M. V. Chitturi, *Downstream Effects of Speed Photo-Radar Enforcement and Other Speed Reduction Treatments on Work Zones*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2107**, S. 24 – 33 (2009).
- [Mee93] V. Meewes, *Mobile und Ortsfeste Geschwindigkeitsüberwachung – Auswirkungen auf Verhalten und Verkehrssicherheit*, Technischer Bericht Mitteilungen Nr. 34, Beratungsstelle für Schadenverhütung Köln, HUK-Verband (1993).
- [MEG13] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 43, *Gesetz zur Neuregelung des gesetzlichen Messwesens – Mess- und Eichgesetz (MessEG) in der Fassung vom 25. Juli 2013* (31. Juli 2013).
- [MEV14] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2014 Teil I Nr. 58, *Verordnung zur Neuregelung des gesetzlichen Messwesens und zur Anpassung an europäische Rechtsprechung – Mess- und Eichverordnung (MessEV) in der Fassung vom 11. Dezember 2014* (17. Dezember 2014).
- [Min01] M. M. Minderhoud und P. H. L. Bovy, *Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment*, Accident Analysis & Prevention **33** (1), S. 89 – 97 (2001).
- [Mäk94] T. E. Mäkinen, *Halo effects of automatic speed enforcement*, in *Third International Conference on Safety and the Environment in the 21st Century – Tel Aviv*, S. 341 – 345 (1994).
- [Mäk03] T. Mäkinen, D. M. Zaidel, G. Andersson, M.-B. Biecheler-Fretel, R. Christ, J.-P. Cauzard, R. Elvik, C. Goldenbeld, C. Gelau, J. Heidstra, M.-C. Jayet, G. Nilsson, P. Papaioanou, A. Quimby, V. Rehnova und T. Vaa, *Traffic enforcement in Europe: effects, measures, needs and future*, Technischer Bericht, Final report of the ESCAPE consortium (2003).
- [Mül12] D. Müller, *Ein Tempolimit gilt so lange bis es wieder aufgehoben wird*, Institut für Verkehrsrecht und Verkehrsverhalten, Bautzen, Braunschweiger Zeitung **22. August** (2012).
- [Mon64] E. W. Montroll und R. B. Potts, *Car Following and Acceleration Noise*, in *An Introduction to Traffic Flow Theory*, Gerlough, D. L. and Capelle, D. G., Nr. 79 in Highway Research Board, Kap. 2, S. 37 – 48 (1964).

- [Mon12] A. Montella, B. Persaud, M. D'Apuzzo und L. L. Imbriani, *Safety Evaluation of Automated Section Speed Enforcement System*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2281**, S. 16 – 25 (2012).
- [Mon15] A. Montella, L. L. Imbriani, V. Marzano und F. Mauriello, *Effects on speed and safety of point-to-point speed enforcement systems: Evaluation on the urban motorway A56 Tangenziale di Napoli*, Accident Analysis & Prevention **75**, S. 164 – 178 (2015).
- [Moo10] J.-P. Moon und J. E. Hummer, *Speed Enforcement Cameras in Charlotte, North Carolina – Estimation of Longer-Term Safety Effects*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2182**, S. 31 – 39 (2010).
- [Mus14] O. Musicant, H. Bar-Gera und E. Schechtman, *Driver Views on Speed and Enforcement*, in *93th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 16 (2014).
- [Nag92] K. Nagel und M. Schreckenberg, *A cellular automaton model for freeway traffic*, Journal de Physique I France **2** (12), S. 2221 – 2229 (1992).
- [Nag07] P. Nagl, S. Kummer, N. Deweis und C. Schwietering, *Ökonomische Aspekte von Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) am Beispiel der VBA Tirol der ASFINAG*, Straßenverkehrstechnik **3**, S. 130 – 139 (2007).
- [Neu99] L. Neubert, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg, *Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis*, Physical Review. E **60** (6), S. 6480 – 6490 (1999).
- [Neu00] L. Neubert, *Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellularer Automaten*, Dissertation, Fachbereich Physik-Technologie der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg (2000).
- [New70] R. F. Newby, *Effectiveness of speed limits on rural roads and motorways*, Traffic Engineering and Control **12** (8), S. 424 – 427 (1970).
- [New01] S. V. Newstead, M. H. Cameron und L. M. W. Leggett, *The crash reduction effectiveness of a network-wide traffic police deployment system*, Accident Analysis & Prevention **33**, S. 393 – 406 (2001).
- [Nil81] G. Nilsson, *The Effects of Speed Limits on Traffic Accidents in Sweden*, in *Proceedings of the International Symposium on the Effects of Speed Limits on Traffic Accidents & Fuel Consumption, Organisation for Economic Cooperation and Development, Ireland*, S. 1 – 8 (1981).

- [Nil82] E. Nilsson und L.-O. Sjögren, *Relationship between enforcement, traffic speeds and traffic accidents*, in *Proceedings of the International Symposium on the Effects of Speed Limits on Traffic Accidents & Fuel Consumption, Organisation for Economic Co-operation and Development, Ireland*, S. 295 – 318 (1982).
- [Nil04] G. Nilsson, *Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety*, Dissertation, Lund Institute of Technology, Department of Technology and Society, Traffic Engineering, Bulletin 221 (2004).
- [NMI14a] Niedersächsisches Ministerium für Inneres und Sport, *Bundesweites Pilotverfahren zu „Section Control“ an der Bundesstraße 6*, Pressemitteilung vom 21. November (2014).
- [NMI14b] Niedersächsisches Ministerium für Inneres und Sport, *Pistorius kündigt Blitzmarathon und Pilotprojekt zur Abschnittskontrolle an*, Pressemitteilung vom 01. September (2014).
- [Nov10] A. M. Novoa, K. Perez, E. Santamarina-Rubio, M. Marí-Dell’Olmo und A. Tobias, *Effectiveness of speed enforcement through fixed speed cameras: a time series study*, *Injury Prevention* **16**, S. 12 – 16 (2010).
- [Oei96] H.-L. Oei, *Automatic Speed Management in the Netherlands*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1560**, S. 57 – 64 (1996).
- [Oei98] H.-L. Oei, *The Effect of Enforcement on Speed Behaviour: A Literature Study*, Technischer Bericht D-98-8, SWOV Institute for Road Safety Research, The Netherlands, Leidschendam (1998).
- [OLG96] Oberlandesgericht Hamm, *2 Ss OWi 1422/95, Zur Weitergeltung einer Geschwindigkeitsbeschränkung hinter einer Autobahnauffahrt* (08.01.1996).
- [OLG98] Bayrisches Oberstes Landesgericht 1. Senat für Bußgeldsachen, *1 ObOWi 134/98, Verkehrsordnungswidrigkeit: Geschwindigkeitsüberschreitung nach Änderung der innerhalb eines Verkehrsleitsystems angeordneten Geschwindigkeitsbeschränkung* (22.06.1998).
- [Osr07] E. Osrael und K. Robatsch, *Section Control – Analyse der Auswirkungen auf das Unfallgeschehen und das Geschwindigkeitsverhalten*, *Straßenverkehrstechnik* **7**, S. 350 – 356 (2007).
- [Ost90] E. Ostvik und R. Elvik, *The effects of speed enforcement on individual road user behaviour and accidents*, in *Enforcement and Rewarding: Strategies and Effects – Proceedings of the International Road Safety Symposium in Copenhagen, Denmark, September 19 – 21*, S. 56 – 59 (1990).

- [Owe16] R. Owen, G. Ursachi und R. Allsop, *The Effectiveness of Average Speed Cameras in Great Britain*, Technischer Bericht, The Royal Automobile Club Foundation for Motoring Ltd (2016).
- [Ozb08] K. Ozbay, H. Yang, B. Bartın und S. Mudigonda, *Derivation and Validation of New Simulation-Based Surrogate Safety Measure*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2083** (1), S. 105 – 113 (2008).
- [Pan92] P. D. Pant, J. A. Adhami und J. C. Niehaus, *Effects of the 65-mph Speed Limit on Traffic Accidents in Ohio*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1375**, S. 53 – 60 (1992).
- [Pap08] M. Papageorgiou, E. Kosmatopoulos und I. Papamichail, *Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2047**, S. 37 – 48 (2008).
- [Pap11] L. Papula, *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3*, Vieweg und Teubner (2011).
- [Pau14a] E. de Pauw, S. Daniels, T. Brijs, E. Hermans und G. Wets, *Automated section speed control on motorways: An evaluation of the effect on driving speed*, Accident Analysis & Prevention **73**, S. 313 – 322 (2014).
- [Pau14b] E. de Pauw, S. Daniels, T. Brijs, E. Hermans und G. Wets, *Behavioural effects of fixed speed cameras on motorways: Overall improved speed compliance or kangaroo jumps?*, Accident Analysis & Prevention **73**, S. 132 – 140 (2014).
- [Pau14c] E. de Pauw, S. Daniels, M. Thierie und T. Brijs, *Safety effects of reducing the speed limit from 90 km/h to 70 km/h*, Accident Analysis & Prevention **62**, S. 426 – 431 (2014).
- [Pfe91] R. C. Pfefer, W. W. Stenzel und B. D. Lee, *Safety Impact of the 65-mph Speed Limit: A Time Series Analysis*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1318**, S. 22 – 33 (1991).
- [Pfe01] M. Pfeiffer und H. Hautzinger, *Auswirkungen der Verkehrsüberwachung auf die Befolgung von Verkehrsvorschriften*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit **M 126** (2001).
- [Pfe02] M. Pfeiffer und R. Wiebusch-Wothge, *Standards der Geschwindigkeitsüberwachung im Verkehr – Vergleich polizeilicher und kommunaler Überwachungsmaßnahmen*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit **M 146** (2002).
- [Pig89] J. G. Pigman, K. R. Agent, J. A. Deacon und R. J. Kryscio, *Evaluation of unmanned Radar Installations*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1244**, S. 7 – 16 (1989).



- [Pip64] L. A. Pipes, *Hydrodynamic Approaches*, in *An Introduction to Traffic Flow Theory*, Gerlough, D. L. and Capelle, D. G., Nr. 79 in Highway Research Board, Kap. 1, S. 1 – 5 (1964).
- [Pis03] T. Pischner, S. Hangleiter, U. Lambacher, S. Trupat, R. Kühne und P. Schick, *Ermittlung und Bewertung der Nutzenkomponenten von Streckenbeeinflussungsanlagen im Hinblick auf den Verkehrsablauf*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **866** (2003).
- [Pla16] J. Plana, F. Soriguera und A. Hegyi, *Effects of Dynamic Speed Limits on a Dutch Freeway*, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 20 (2016).
- [Pér07] K. Pérez, M. Marí-Dell’Olmo, A. Tobias und C. Borrell, *Reducing Road Traffic Injuries: Effectiveness of Speed Cameras in an Urban Setting*, American Journal of Public Health **97** (9), S. 1632 – 1637 (2007).
- [Pra95] H. Praxenthaler, *Die Sache mit der Geschwindigkeit – Teil 1: Von den Anfängen bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges*, Straßenverkehrstechnik **9**, S. 428 – 436 (1995).
- [Pra96a] H. Praxenthaler, *Die Sache mit der Geschwindigkeit – Teil 2: Vom Ende des Zweiten Weltkrieges bis zum Beginn der 70er Jahre*, Straßenverkehrstechnik **2**, S. 73 – 81 (1996).
- [Pra96b] H. Praxenthaler, *Die Sache mit der Geschwindigkeit – Teil 3: Vom Beginn der 70er Jahre bis in die Mitte der 80er Jahre*, Straßenverkehrstechnik **10**, S. 496 – 505 (1996).
- [Pra96c] H. Praxenthaler, *Die Sache mit der Geschwindigkeit – Teil 4: Von den 80er Jahren bis in die Gegenwart*, Straßenverkehrstechnik **12**, S. 596 – 605 (1996).
- [Pra99] H. Praxenthaler, *Die Sache mit der Geschwindigkeit – Geschichte der Tempobeschränkungen im Für und Wider*, Bd. 15 von *Archiv für die Geschichte des Straßen- und Verkehrswesens*, herausgegeben von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Kirschbaum Verlag, Bonn (1999).
- [PTB58] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *Zulassung zur Beglaubigung der Bauart des Geschwindigkeitsmessgerätes Typ "Verkehrsradargerät"VRG 2 mit Fotozusatzeinrichtung* (1958).
- [PTB15] Physikalisch-Technische Bundesanstalt, *PTB-Anforderungen 12.01, Messgeräte im öffentlichen Verkehr – Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte* (2015).
- [Qui99a] A. Quimby, G. Maycock, C. Palmer und S. Buttress, *The factors that influence a driver’s choice of speed – a questionnaire study*, Technischer Bericht TRL Report 325, Transport Research Laboratory (1999).

- [Qui99b] A. Quimby, G. Maycock, C. Palmer und G. B. Grayson, *Drivers' speed choice: an in-depth study*, Technischer Bericht TRL Report 326, Transport Research Laboratory (1999).
- [Rag91] R. S. Ragnarsson und T. Björgvinsson, *Effects of public posting on driving speed in Icelandic traffic*, Journal of Applied Behavior Analysis **24** (1), S. 53 – 58 (1991).
- [Rag11] A. Ragnøy, *Automatic section speed control – Results of Evaluation*, Technischer Bericht 1 E, Traffic Safety Section, Directorate of Public Roads, Traffic Safety, Environment and Technology Department (2011).
- [Rag13] A. Ragnøy, *Automatic section speed control in tunnels – Effects on speed and accidents*, Technischer Bericht 142 E, Traffic Safety Section, Directorate of Public Roads, Traffic Safety, Environment and Technology Department (2013).
- [Ret99] H.-G. Retzko und C. Korda, *Auswirkungen unterschiedlicher zulässiger Höchstgeschwindigkeiten auf städtischen Verkehrsstraßen*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik **V 65** (199).
- [Ret03] R. A. Retting und C. M. Farmer, *Evaluation of Speed Camera Enforcement in the District of Columbia*, in *82th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 13 (2003).
- [Ret08a] R. A. Retting, C. M. Farmer und A. T. McCartt, *Evaluation of Automated Speed Enforcement in Montgomery County, Maryland*, Traffic Injury Prevention **9** (5), S. 440 – 445 (2008).
- [Ret08b] R. A. Retting und E. R. Teoh, *Traffic Speeds on Interstates and Freeways 10 Years After Repeal of National Maximum Speed Limit*, Traffic Injury Prevention **9** (2), S. 119 – 124 (2008).
- [Ric08] B. Ricker, *Geschwindigkeitsmessungen, ein Beitrag zur Verkehrssicherheitsarbeit*, in *244. PTB-Seminar in Braunschweig - 50 Jahre Geschwindigkeitsüberwachungsgeräte mit Zulassung der PTB* (2008).
- [Rie15] G. Riegelhuth und M. Glatz, *Zuverlässiger Betrieb von Streckenbeeinflussungsanlagen auf Basis einer antizipierenden, regelbasierten Steuerung*, Straßenverkehrstechnik **4**, S. 245 – 258 (2015).
- [Rig16a] G. Riggins, R. L. Bertini, W. Ackaah und K. Bogenberger, *Measurement and Assessment of Driver Compliance with Variable Speed Limit Systems: Comparison of U.S. and Germany*, in *95th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 18 (2016).

- [Rig16b] G. Riggins, R. L. Bertini, W. Ackaah und M. Margreiter, *Evaluation of Driver Compliance to Displayed Variable Advisory Speed Limit Systems: Comparison between Germany and the U.S.*, Transportation Research Procedia – International Symposium on Enhancing Highway Performance (ISEHP) **15**, S. 640 – 651 (2016).
- [Rob16] K. Robatsch, B. Strnad und A. Soteropoulos, *Section Control: Wirksamkeit und Einsatzempfehlungen*, Straßenverkehrstechnik **9**, S. 560 – 568 (2016).
- [Roc95] S. M. Rock, *Impact of the 65 mph Speed Limit on Accidents, Deaths and Injuries in Illinois*, Accident Analysis & Prevention **27** (2), S. 207 – 214 (1995).
- [Rog94] P. Rogerson, S. Newstead und M. Cameron, *Evaluation of the Speed Camera Program in Victoria 1990 – 1991, Phase 3: Localised Effects on Casualty Crashes and Crash Severity, Phase 4: General Effects on Speed*, Technischer Bericht Report No. 54, Accident Research Centre, Monash University (1994).
- [Roh04] J. Rohde, *Untersuchung der Steueralgorithmik der Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der BAB2*, Diplomarbeit, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover (2004).
- [Roo90] A. J. Rooijers und R. A. de Bruin, *Selective enforcement of speeding behaviour in built-up areas*, in *Enforcement and Rewarding: Strategies and Effects – Proceedings of the International Road Safety Symposium in Copenhagen, Denmark, September 19 – 21*, S. 51 – 54 (1990).
- [Ros62] F.-W. Rosemeier, *Einführung in die Verkehrs-Radar-Meßtechnik*, Carl Heymanns Verlag (1962).
- [Rot88] T. Rothengatter, *Risk and absence of pleasure: a motivational approach to modelling road user behaviour*, Ergonomics **31** (4), S. 599 – 607 (1988).
- [Rot99] T. Rothengatter, R. Fuller, C. Goldenbeld, M.-C. Jayet, T. Mäkinen, G. Nilsson, A. Quimby, S. Siegrist, H. Utzelmann und T. Vaa, *Police enforcement strategies to reduce traffic casualties in Europe*, Technischer Bericht, European Transport Safety Council, Brussels, Belgium (1999).
- [Roz06] W. G. J. Rozendal, *Traffic supervision in the Netherlands*, in *15. EVU-Jahrestagung, Dresden*, Bureau Verkeershandhaving Openbaar Ministerie, Soesterberg (NL), S. 45 – 49 (2006).
- [Rye12] E. O. Ryeng, *The effect of sanctions and police enforcement on drivers' choice of speed*, Accident Analysis & Prevention **45**, S. 446 – 454 (2012).
- [Say16] T. Sayed und E. Sacchi, *Evaluating the safety impact of increased speed limits on rural highways in British Columbia*, Accident Analysis & Prevention **95**, S. 172 – 177 (2016).

- [SBA17] Statistisches Bundesamt, *Verkehr – Verkehrsunfälle – 2016, Fachserie 8, Reihe 7* (2017).
- [SC12] K. R. Santiago-Chaparro, M. Chitturi, A. Bill und D. A. Noyce, *Spatial Effectiveness of Speed Feedback Signs*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2281**, S. 8 – 15 (2012).
- [Sch66] J. Schlums und F. Burkhardt, *Beobachtung des Verkehrsablaufs auf der Bundesautobahn zwischen Mannheim und Heidelberg vor und nach Aufhebung einer Geschwindigkeitsbeschränkung*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **45** (1966).
- [Sch03] P. Schick, *Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses*, Dissertation, Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 35, Universität Stuttgart (2003).
- [Sch07a] E. Schnieder (Hg.), *Verkehrsleittechnik, Kapitel 6 – Flusssteuerung im Straßenverkehr*, Springer Berlin (2007).
- [Sch07b] T. Scholz, A. Schmallowsky und T. Wauer, *Auswirkungen eines allgemeinen Tempolimits auf Autobahnen im Land Brandenburg*, Technischer Bericht, Schlothauer & Wauer, Ingenieurgesellschaft für Straßenverkehr (2007).
- [Sch10a] H. Schüller, *Modelle zur Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Stadtstraßen und dessen Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit auf Grundlage der Straßengestaltung*, Technischer Bericht, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Fakultät für Verkehrswissenschaften Friedrich List, Technische Universität Dresden (2010).
- [Sch10b] C. Schwietering, *Verfahren zur Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und Anwendung in der Verkehrssteuerung*, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (2010).
- [Sch11] C. Schulze, B. Schlag und T. Gehlert, *Wirkungsvergleich dynamischer Geschwindigkeitsrückmeldeanlagen*, Straßenverkehrstechnik **3**, S. 145 – 151 (2011).
- [Sch16] E. Schechtman, H. Bar-Gera und O. Musicant, *Driver views on speed and enforcement*, Accident Analysis & Prevention **89**, S. 9 – 21 (2016).
- [Shi15] J. Shim, S. H. Park, S. Chung und K. Jang, *Enforcement avoidance behavior near automated speed enforcement areas in Korean expressways*, Accident Analysis & Prevention **80**, S. 57 – 66 (2015).

- [Sie00] W. Siegener und K. Träger, *Unfallgeschehen im Bereich von Streckenbeeinflussungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Verkehrsbelastung*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **787** (2000).
- [Sis99] V. P. Sisiopiku und H. Patel, *Study of the Impact of Police Enforcement on Motorists' Speeds*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **1693**, S. 31 – 36 (1999).
- [Smu90] S. Smulders, *Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs*, Transportation Research Part B: Methodological **24B** (2), S. 111 – 132 (1990).
- [Soo13] D. W. Soole, B. C. Watson und J. J. Fleiter, *Effects of average speed enforcement on speed compliance and crashes: A review of the literature*, Accident Analysis & Prevention **54**, S. 46 – 56 (2013).
- [Sor13] F. Soriguera, J. M. Torné und D. Rosas, *Assessment of Dynamic Speed Limit Management on Metropolitan Freeways*, Journal of Intelligent Transportation Systems **17** (1), S. 78 – 90 (2013).
- [Sor14] F. Soriguera und M. Sala, *Freeway Lab: Testing Dynamic Speed Limits*, in *XI Congreso de Ingeniería del Transporte, Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 160, S. 35 – 44 (2014).
- [Sor15a] F. Soriguera, I. Martinez-Josemaria und M. Menéndez, *Experimenting with Dynamic Speed Limits on Freeways*, in *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 20 (2015).
- [Sor15b] M. Sormes, *Auswirkungen angekündigter Geschwindigkeitsmessungen auf das Geschwindigkeitsniveau – Empirische Untersuchung im Zuständigkeitsbereich der Polizeidirektion Sachsen-Anhalt Süd am Beispiel der Stadt Sangerhausen*, Diplomarbeit, Deutsche Hochschule der Polizei (2015).
- [Sta13] P. Stanojevic, D. Jovanovic und T. Lajunen, *Influence of traffic enforcement on the attitudes and behavior of drivers*, Accident Analysis & Prevention **52**, S. 29 – 38 (2013).
- [Ste00] C. Steinhoff, H. Keller und R. Kates, *Driver perceptions and the effectiveness of preventative traffic management strategies*, in *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Systems*, S. 8 (2000).
- [Ste02] C. Steinhoff, R. Kates, H. Keller und B. Färber, *Problematik präventiver Schaltungen von Streckenbeeinflussungsanlagen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **853** (2002).
- [Ste03a] B. Steinauer, T. Kathmann, D. Liebehenschel und M. Bartsch, *Überprüfung von Geschwindigkeitswarnanlagen*, Straßenverkehrstechnik **10**, S. 534 – 542 (2003).

- [Ste03b] C. Steinhoff, *Online-Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen*, Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrstechnik, Heft 1, Technische Universität München (2003).
- [Ste05] C. Stefan und M. Winkelbauer, *Section Control – Automatic Speed Enforcement in the Kaisermühlen Tunnel*, Technischer Bericht, Austrian Road Safety Board, Kuratorium für Verkehrssicherheit (KfV) (2005).
- [Ste06] J. Stern, B. Schlag, L. Rößger, T. Fischer und J. Schade, *Wirkungen und Akzeptanz polizeilicher Verkehrsüberwachung*, Verlag für Polizeiwissenschaften, Schriftenreihe Polizei & Wissenschaft (2006).
- [Sti14] H. Stigson, J. Hagberg, A. Kullgren und M. Krafft, *A One Year Pay-as-You-Speed Trial With Economic Incentives for Not Speeding*, Traffic Injury Prevention **15** (6), S. 612 – 618 (2014).
- [Str90] F. M. Streff und R. H. Schultz, *The 65-mph Speed Limit in Michigan: A Second Year Analysis of Effects on Crashes and Crash Casualties*, Technischer Bericht Final Report UMTRI-90-37, Transportation Research Institute, University of Michigan (1990).
- [Str07] S. G. Stradling, *Car driver speed choice in Scotland*, Ergonomics **50** (8), S. 1196 – 1208 (2007).
- [Str16] P. Strömgren und G. Lind, *Harmonization with Variable Speed Limits on Motorways*, Transportation Research Procedia – International Symposium on Enhancing Highway Performance (ISEHP) **15**, S. 664 – 675 (2016).
- [Stu16] H. A. Stumpen, *Ankündigungen von Geschwindigkeitsmessungen*, Polizei Verkehr + Technik **6**, S. 10 – 13 (2016).
- [Sug08] Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S.-i. Tadaki und S. Yukawa, *Traffic jams without bottlenecks – experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam*, New Journal of Physics **10** (033001), S. 7 (2008).
- [Sum80] H. Summala, R. Näätänen und M. Roine, *Exceptional condition of police enforcement: Driving speeds during the police strike*, Accident Analysis & Prevention **12**, S. 179 – 184 (1980).
- [SVO13] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 12, *Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) in der Fassung vom 6. März 2013* (12. März 2013).
- [Tar09] A. Tarko, G. Davis, N. Saunier, T. Sayed und S. Washington, *Surrogate measures of safety. White Paper*, Technischer Bericht, ANB20 (3) Subcommittee on Surrogate Measures of Safety (2009).

- [Tay00] M. C. Taylor, D. A. Lynam und A. Baruya, *The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents*, Technischer Bericht TRL Report 421, Transport Research Laboratory (2000).
- [Tay09] R. Tay, *The Effectiveness of Automated and Manned Traffic Enforcement*, International Journal of Sustainable Transportation **3**, S. 178 – 186 (2009).
- [Tee93a] N. Teed und A. K. Lund, *The effect of laser speed-measuring devices on speed limit law enforcement in Charleston, South Carolina*, Accident Analysis & Prevention **25** (4), S. 459 – 463 (1993).
- [Tee93b] N. Teed, A. K. Lund und R. Knoblauch, *The duration of speed reductions attributable to radar detectors*, Accident Analysis & Prevention **25** (2), S. 131 – 137 (1993).
- [Tho08] L. J. Thomas, R. Srinivasan, L. E. Decina und L. Staplin, *Safety Effects of Automated Speed Enforcement Programs: Critical Review of International Literature*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2078**, S. 117 – 126 (2008).
- [Tho14] O. Thom, *Untersuchung der Eignung von Surrogate Safety Measures (SSM) zur Beschreibung von Unfall- und kritischen Situationen*, Diplomarbeit, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Fakultät für Verkehrswissenschaften Friedrich List, Technische Universität Dresden (2014).
- [TLS12] Bundesanstalt für Straßenwesen, *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS)* (2012).
- [Tor14] J. M. Torné, D. Ramoneda und F. Soriguera, *Empirical evidences of dynamic speed limit impact on an metropolitan freeway*, in XVIII Congreso – Panamericano de Ingenieria de Transito, Transporte y Logistica, Procedia – Social and Behavioral Sciences, Bd. 162, S. 80 – 89 (2014).
- [Tra07] R. Trapp, M. Brake, M. Burger, M. Feldges, F. Frischeisen, K. Hahn, G. Kapich, K. Lorenz, S. Piszczek, T. Sachse, D. Stamm, V. Stottmeister, S. Trupat, E. Üstün und R. Weiss, *Hinweise zur Wirksamkeitsschätzung und Wirksamkeitsberechnung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen*, Technischer Bericht, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007).
- [Tra08] R. Trapp und M. Feldges, *Ermittlung der Wirksamkeit von Verkehrsbeeinflussungsanlagen*, in Deutscher Straßen- und Verkehrskongress, 8. bis 10. Oktober, Düsseldorf, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, S. 272 – 280 (2008).
- [TRB11] Transportation Research Circular – Transportation Research Board of the National Academies, *75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory – Greenshields Symposium*, Bd. E-C149 (2011).

- [TRC06] Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) – European Conference of Ministers of Transport (ECMT) – Joint Transport Research Centre, *Speed Management* (2006).
- [Ull14] G. L. Ullman und M. A. Brewer, *Driver Perceptions of Traffic-Calming Versus Active Enforcement Efforts in Work Zones*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2425** (1), S. 25 – 31 (2014).
- [Vaa97] T. Vaa, *Increased police enforcement: Effects on speed*, Accident Analysis & Prevention **29** (3), S. 373 – 385 (1997).
- [Vad14] A. Vadeby und A. Forsman, *Evaluation of New Speed Limits in Sweden: A Sample Survey*, Traffic Injury Prevention **15** (8), S. 778 – 785 (2014).
- [Vad17] A. Vadeby und A. Forsman, *Traffic safety effects of new speed limits in Sweden*, Accident Analysis & Prevention **In Press** (2017).
- [Van14] W. Vanlaar, R. Robertson und K. Marcoux, *An evaluation of Winnipeg’s photo enforcement safety program: Results of time series analyses and an intersection camera experiment*, Accident Analysis & Prevention **62**, S. 238 – 247 (2014).
- [Vog03] K. Vogel, *A comparison of headway and time to collision as safety indicators*, Accident Analysis & Prevention **35**, S. 427 – 433 (2003).
- [Waa94] D. de Waard und T. Rooijers, *An experimental study to evaluate the effectiveness of different methods and intensities of law enforcement on driving speed on motorways*, Accident Analysis & Prevention **26** (6), S. 751 – 765 (1994).
- [Wal11] L. Walter, J. Broughton und J. Knowles, *The effects of increased police enforcement along a route in London*, Accident Analysis & Prevention **43** (3), S. 1219 – 1227 (2011).
- [Wal12] E. Walker, D. W. Soole, J. Fleiter und B. Watson, *Point-To-Point Speed Enforcement*, Technischer Bericht No. AP-R415-12, Austroads Publication (2012).
- [War52] J. G. Wardrop, *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research*, in *Road Engineering Division Meeting*, Road Paper No. 36, S. 325 – 362 (1952).
- [Wei13] S. Weikl, K. Bogenberger und R. L. Bertini, *Traffic Management Effects of Variable Speed Limit System on a German Autobahn: Empirical Assessment Before and After System Implementation*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2380**, S. 48 – 60 (2013).
- [Wep65] U. W. Wepf, *Geschwindigkeitsbeschränkung und Unfallgeschehen*, Straßenverkehrstechnik **1-2**, S. 23 (1965).



- [Wil13] B. Wilmots, E. Hermans, T. Brijs und G. Wets, *The effect of speed control with a mobile radar with or without an advanced warning sign: a statistical analysis on speeding behaviour*, in *92th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, S. 15 (2013).
- [Woo07] T. H. Woo, S.-M. Ho und H.-L. Chen, *Monitoring Displays Coupled with Speed Cameras: Effectiveness on Speed Reduction*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2009**, S. 30 – 36 (2007).
- [Yan12] H. Yang, *Simulation-Based Evaluation of Traffic Safety Performance using Surrogate Safety Measures*, Dissertation, Graduate School-New Brunswick (2012).
- [Zaa94] D. Zaal, *Traffic Law Enforcement: A Review of the Literature*, Technischer Bericht Report No. 53, Accident Research Centre, Monash University (1994).
- [Zac71] H. Zackor, *Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Bundesautobahnen durch verkehrsabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen*, Dissertation, Universität (TH) Karlsruhe (1971).
- [Zac72] H. Zackor, *Beurteilung verkehrsabhängiger Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **128** (1972).
- [Zac88] H. Zackor und G. Schwenzer, *Beurteilung einer situationsabhängigen Geschwindigkeitsbeeinflussung auf Autobahnen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik **532** (1988).